

沃尔特·阿尔瓦雷斯 著
马星垣 车宝印 译

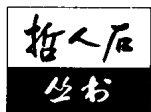
当代科普名著系列

霸王龙 和 陨星坑

——天体撞击如何
导致物种灭绝

哲人石
丛书

上海科技教育出版社



Philosopher's Stone Series

霸王龙和陨星坑

——天体撞击如何导致物种灭绝

沃尔特·阿尔瓦雷斯 著

马星垣 车宝印 译

上海科技教育出版社

T. rex and the Crater of Doom

by

Walter Alvarez

Copyright © 1997 by Princeton University Press

Chinese (Simplified Character) Trade Paperback copyright © 2001 by

Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House

Published by arrangement with Princeton University Press

in association with Arts & Licensing International, Inc., USA

ALL RIGHTS RESERVED.

上海科技教育出版社业经 Arts & Licensing International, Inc., USA

协助取得本书中文简体字版权

责任编辑 卞毓麟 何妙福 装帧设计 汤世梁

哲人石丛书

霸王龙和陨星坑

——天体撞击如何导致物种灭绝

沃尔特·阿尔瓦雷斯 著

马星垣 车宝印 译

上海科技教育出版社出版发行

(上海冠生园路 393 号 邮政编码 200235)

各地新华书店经销 常熟印刷八厂印刷

ISBN 7-5428-2564-X/N·418

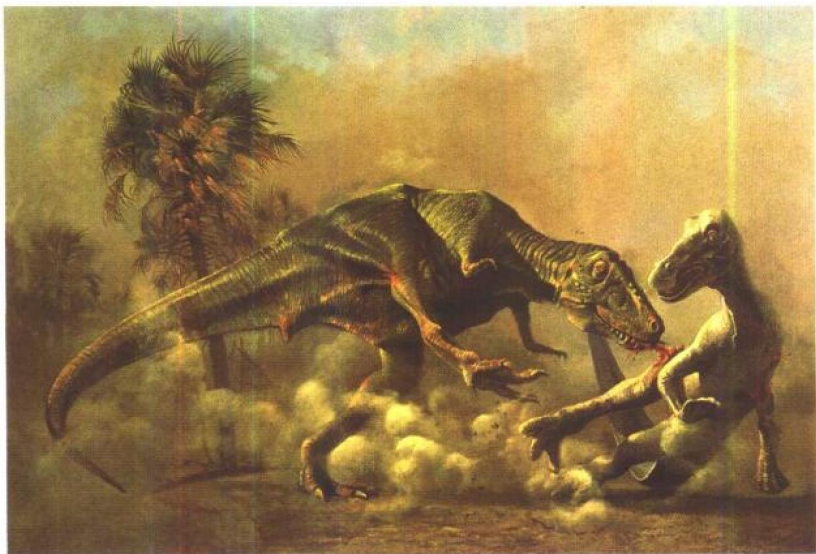
图字 09-1999-279 号

开本 850×1168 1/32 印张 6 插页 8 字数 140 000

2001 年 7 月第 1 版 2001 年 7 月第 1 次印刷

印数 1-5 000 定价: 16.90 元

白垩纪的最后日子

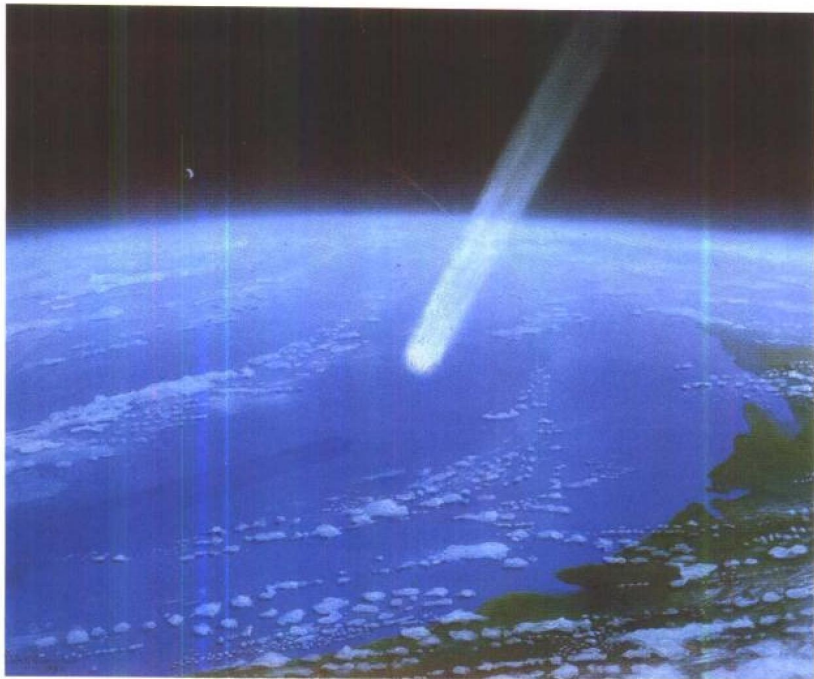


彩图1 北美洲西部白垩纪最后日子的景象——霸王龙击倒埃德蒙龙。(罗素构思，基什绘制)

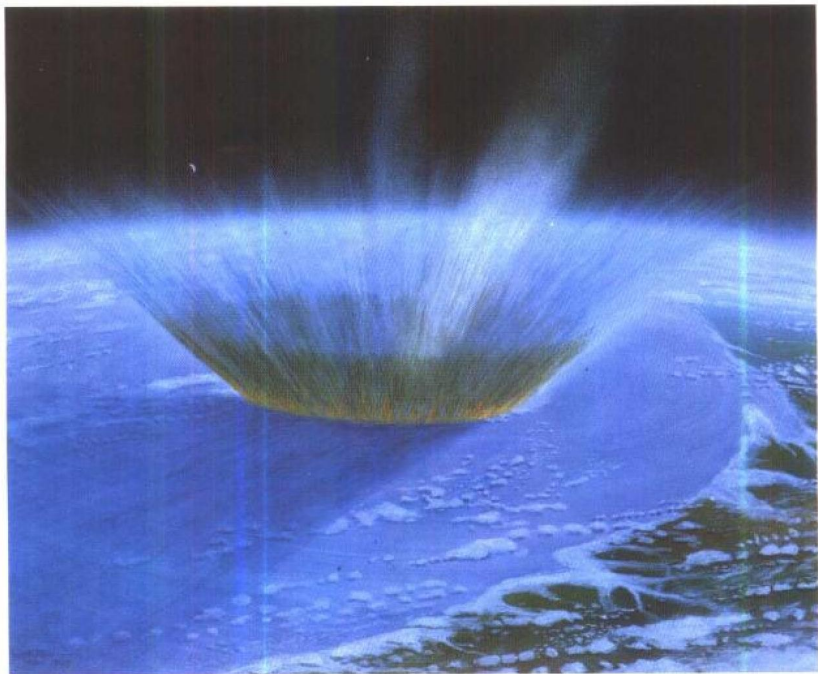


彩图2 撞击天体进入地球大气层前白垩纪最后日子的地球景象。(哈特曼绘制)

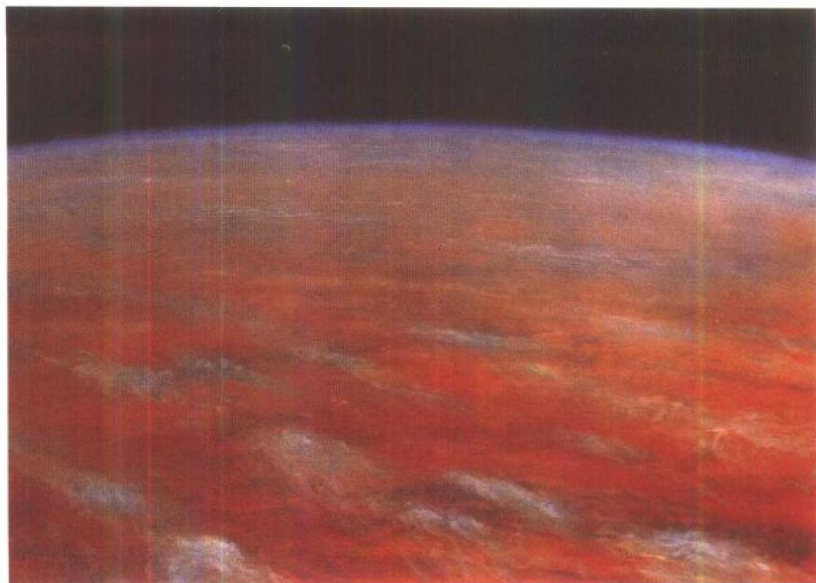
撞击



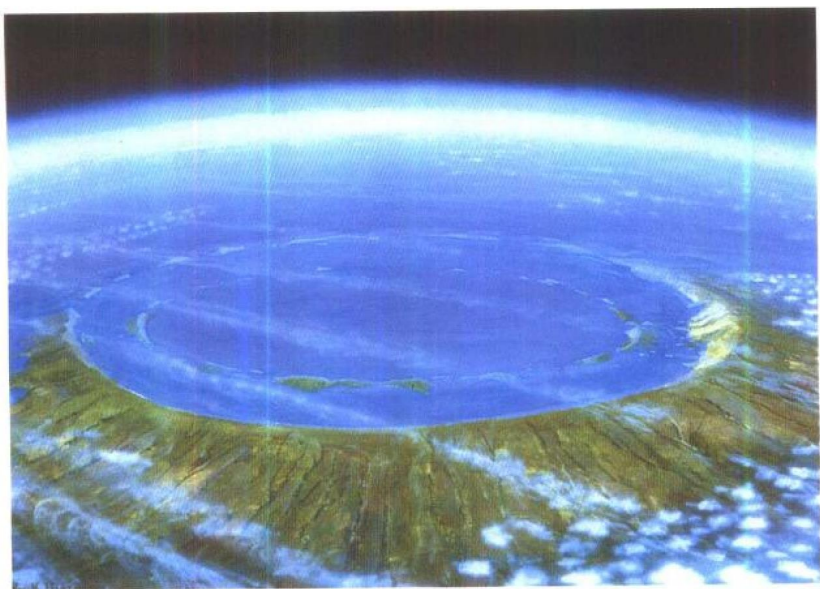
彩图3 白垩纪结束前最后两秒钟的地球景象。科学家们尚未确定撞击天体是彗星还是小行星，但他们的确知道该天体直径至少10千米，进入地球大气的速度在30千米/秒到70千米/秒之间。（哈特曼绘制）



彩图 4 撞击的瞬间。首先发生的破坏波由巨大的喷射物幕造成，撞击之后几乎立即开始形成这种幕。（哈特曼绘制）



彩图 5 撞击造成的严冬。一些破坏波产生了大量的大气碎屑，使整个地球遮蔽在尘埃覆盖物中。覆盖物完全堵绝了太阳光，使地球表面至少有好几个月陷入完全黑暗之中。或许正是“撞击的严冬”使恐龙灭绝，同时使地球上其他全部生命之半也遭到灭绝。（哈特曼绘制）

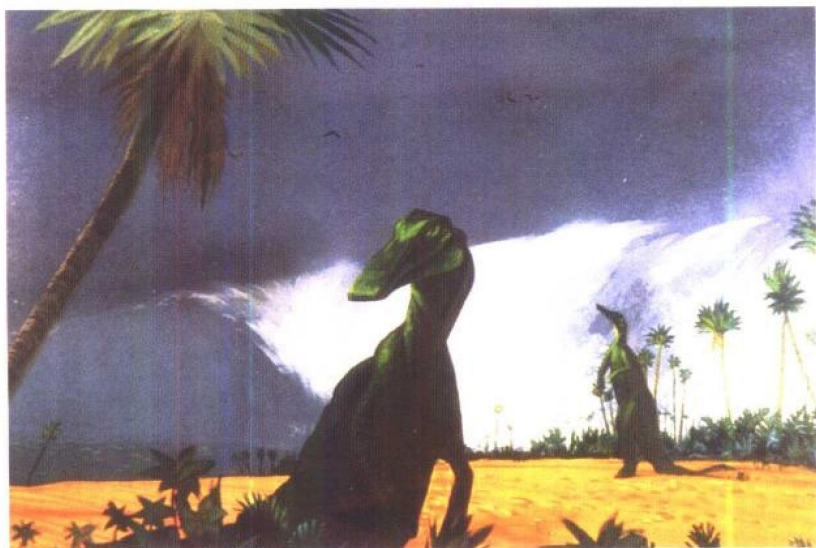


彩图6 带来厄运的撞击坑。阳光重新照到地球之后庞大撞击坑之景观。撞击天体已毁，撞击坑已形成，位于今尤卡坦半岛的北海岸上。（哈特曼绘制）

海啸

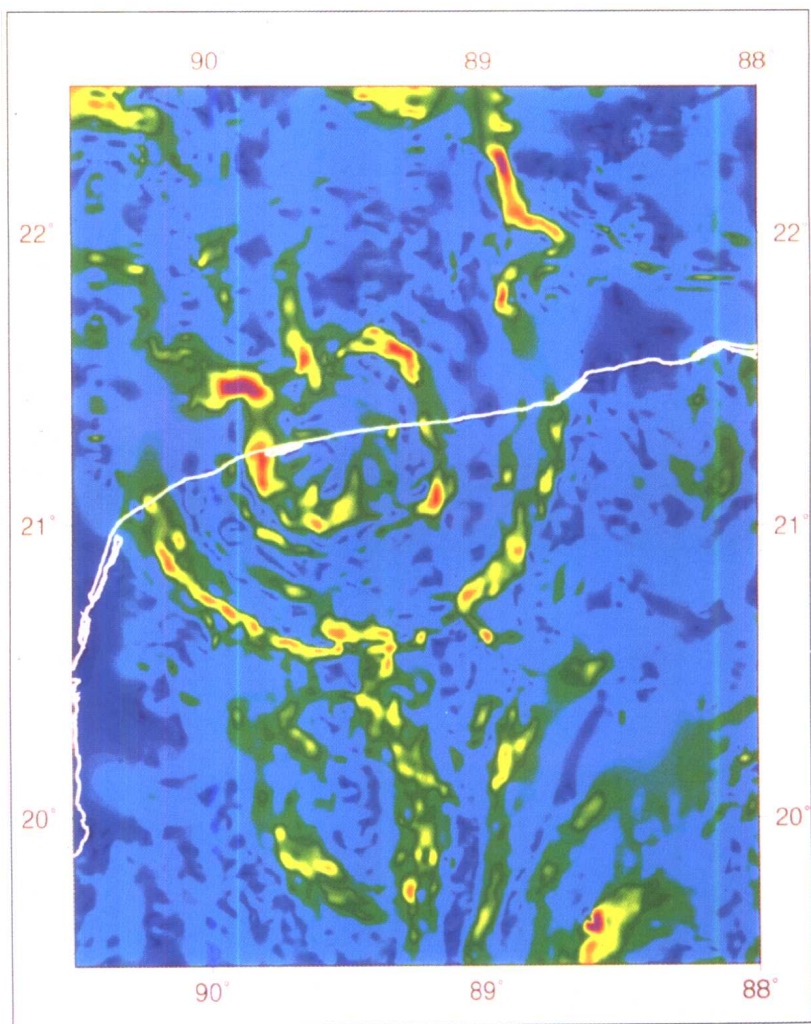


彩图 7

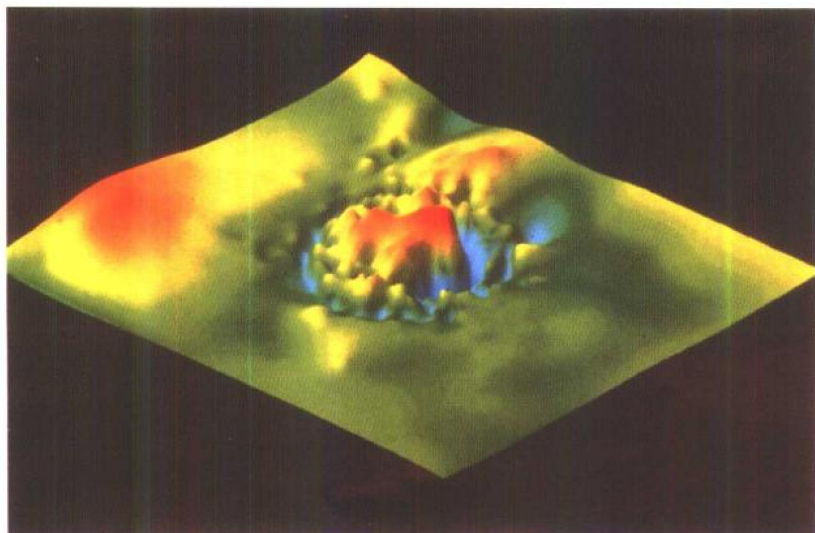


彩图 7~8 撞击天体造成了极其巨大的海啸。海啸可能有数千米之高，破坏掉这附近的全部海岸线，吞没了生活在这些区域的恐龙。（彩图 7 由唐·戴维斯绘制，彩图 8 由朗·米勒绘制）

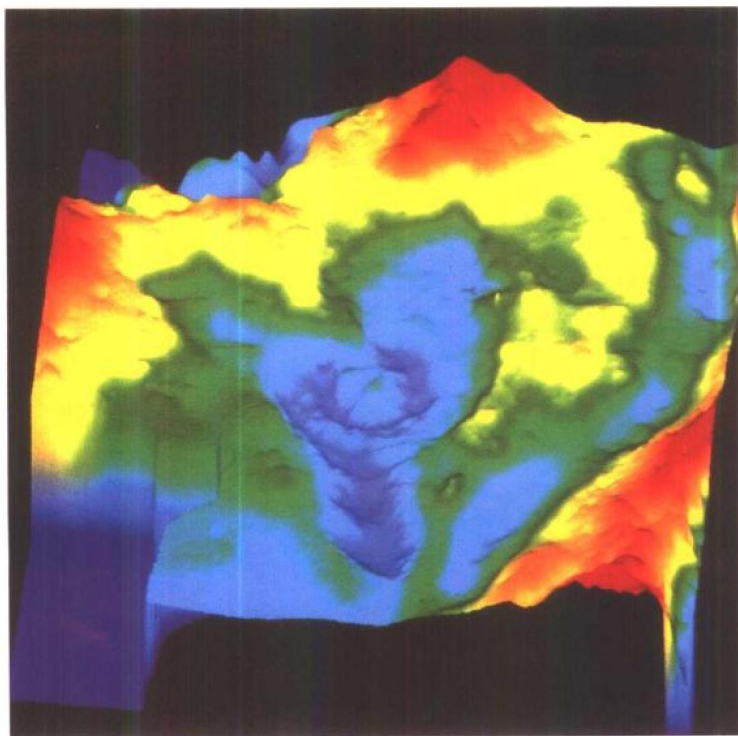
“冒烟的大炮”——验证撞击坑的存在



彩图9 奇克苏鲁布地方的重力梯度图。(加拿大地质调查局希尔德布兰德特许重印)



彩图 10 奇克苏鲁布地方的异常磁场透视图。(加拿大地质调查局皮尔金顿
特许重印)



彩图 11 奇克苏鲁布地方的重力场透视图。(加拿大地质调查局皮尔金顿特许重印)

太阳系内的撞击



彩图 12 苏梅克—利维观测小组成员合影。该观测组发现了分裂为碎片并于 1994 年击中木星的那颗彗星。从左到右为尤金·苏梅克，他的妻子卡罗琳，戴维·利维及其妻子温迪。（吉恩·米勒摄）

内 容 提 要

地球上发生过多多次大规模的生物灭绝,它们似乎相当神秘。然而,其中最著名的那一次事件——恐龙灭绝的起因,在最近二三十年间终于渐趋明朗。那是6500万年前,一颗彗星或小行星冲向地球,在墨西哥的尤卡坦半岛北海岸撞出一个巨大的陨星坑,同时造成地面环境剧变,最终致使大批动植物物种完全丧失继续生存的条件。在这场灭顶之灾中,最著名的牺牲品当推身躯庞大、形貌凶猛的霸王龙。

本书的作者就是揭示这场灾变的关键人物——美国国家科学院院士沃尔特·阿尔瓦雷斯。本书之妙不仅在于向读者娓娓道出了恐龙灭绝的案情,而且尤为引人入胜的是,它步步深入地再现了与此相关的全部科学思想和科学方法,使读者宛如目击这些科学家如何思考问题、发现线索、深入现场、历尽艰辛、终至使整个事态真相大白。它是几位地质学家向自己从事的学科即真理这一观点挑战的故事,是另一些地质学家坚定地维护传统观念的故事,是发生争执和建立友谊的故事,是在遥远地区冒险、在实验室中辛勤测量的故事,是迷茫和发现的故事,是许多国家的科学家为解决一个令人神往的疑谜而共同奋斗的故事。

作者简介

沃尔特·阿尔瓦雷斯(Walter Alvarez),美国国家科学院院士,美国加利福尼亚大学伯克利分校地质学和地球物理学教授。其父路易斯·阿尔瓦雷斯(Luis Alvarez)是该校物理学教授,曾因发现许多亚原子粒子而荣获 1968 年诺贝尔物理学奖。在很大程度上,查明天体撞击地球如何导致恐龙灭绝,应归功于这父子俩的密切合作。

谨以本书献给
米莉·阿尔瓦雷斯，
一位在心理治疗领域里富有爱心的
优秀专家，历时 30 载遍及五大洲的
地质考察的忠实伴侣

序 言

本书叙述关于地球历史上可怕的一天的故事。

我们来到这个世界上对我们诞生以前发生的事是一无所知的。随着我们的成长,我们得以知道往昔岁月所发生的事件。从父母和亲戚那里我们听到我们家庭的历史,从书籍中我们读到人类的历史。但我们生活于其上的行星,往回追溯到人类出现以前,逝去的岁月悠久漫长,既没有目击者,也没有第一手的记载能够告诉我们地球的历史。

然而,对地球的历史我们还是能够知道很多,这是因为在岩石中有着记录。地质学家和古生物学家是研究地球史的专家,他们勘察世界各个遥远地区的岩石,把样品带回到实验室进行分析,从而解读出这些记录。通过观察、测量和解读经历世代代积存在岩石中的信息,地质学家们和古生物学家们共同编织出地球的历史画卷,一直追溯到 46 亿年前地球的起源。

地球有着哪种类型的演化史呢? 地球的历史是一系列激变、灾变和剧变过程的历史呢,抑或我们这颗行星的历史只是一种平稳的渐进变化过程? 早期的大多数地球研究者是灾变论者,但当地质学成为一门成熟科学,地质学家们发现,地球表面的地貌特征,甚至像阿尔卑斯山和大峡谷这样一些非比寻常的地貌都能用地球历史上时间跨度极大的缓慢、渐

进的变化来很好地说明。地质学家们把他们在岩石记录中所观察到的一切现象用渐变论的观点来作合理的解释,而不去注意过去发生的巨大灾变。

今天,正出现一种较为开放的观点,它兼顾渐进论和灾变论,使两者不再相互排斥。地质学家们后来发现,地球历史上的大多数变化是缓慢和渐进地进行的。但存在一种新的看法,即在少数情况下,地球遭受到巨大的灾变,它彻底改变了随后的一系列事件的过程。

本书介绍地球史学家们如何揭示出地球过去曾经发生一次巨大灾变的证据,它是**6500**万年前来自外空的一块巨岩,在墨西哥的尤卡坦半岛上撞出一个巨大的陨星坑,并造成地面环境极度混乱,以致很多种类的动物和植物永久地灭绝了。在这次剧变中,最著名的牺牲品是巨大的食肉恐龙——霸王龙。

这一撞击和它造成的生物灭绝的故事富有戏剧性而令人恐惧。虽然经历**6500**万年的漫长过程,它已变得十分久远而淡漠,但堪与这一事件本身的历史价值相比的是,地球史学家们如何发现这一大撞击的岩石记录,并学会解读与说明这一证据的故事本身充满着人文价值。它是几位地质学家对长期认为自己从事的学科是真理这一观点作出挑战的故事,又是其他地质学家坚定地为传统观点辩护的故事,是发生争执和建立友谊的故事,是在遥远地区冒险、在实验室中辛勤测量的故事,是迷茫和发现的故事,是许多国家的科学家为解决一个令人神往的疑谜而共同奋斗的故事。

它也是地质学和其他已经成熟的地球科学怎样

因各学科之间的固有特性及其研究内容的复杂性而区分的故事。为了达到了解地球这一中心目标,显然需要推动这些学科从简化的科学向全面的科学发展,这也使这些学科显示出各自的特色。整个 20 世纪,物理学、化学以及现在的分子生物学在认识自然界方面,通过分析的方法(即把问题还原为它们的基本成分,然后孤立地研究这些基本成分)已经获得巨大的飞跃。到 21 世纪,科学将开始把各个分科的知识综合在一起,以求得综合地、全面地了解自然界。地球科学天生具有综合性,因而当仁不让地被推上领导这一发展潮流的地位。研究撞击事件和生物灭绝的故事详细地阐明了这一切是怎样发生的。

从首次发现恐龙灭绝时的大撞击证据起,就潜心于这项冒险的研究,这正是我的幸运。在最初的大约 10 年,许多科学家发现了越来越多的支持那次大撞击的证据,但是寻找那个陨星坑的全部努力都落了空。最后,在 1991 年,长期寻觅的陨星坑终于被证认出来,它隐匿于尤卡坦半岛的地下。

在我们彻底了解 6 500 万年前的剧烈撞击之前,还有大量的研究尚待进行。但是陨星坑的证认是一个转折点,因而,这是讲述它的发现故事的最佳时机。在这样做的时候,我力图使本书成为对科学有兴趣的所有读者易懂的读物。此外,还增写了大量注释和参考文献,对那些希望更深入地涉猎这些内容的读者,我力图使这些资料成为有用的研究起点。

本书的任何读者将会发觉我受益于许多科学家。他们之中我愿选出路易斯·W·阿尔瓦雷斯(Luis W. Alvarez),阿萨罗(Frank Asaro),费希尔(Alfred G.

Fischer), 威廉·劳里 (William Lowrie), 马勒 (Richard A. Muller), 尤金·M·苏梅克 (Eugene M. Shoemaker) 和斯米特 (Jan Smit) 以及与我多年共事的复兴地质学研究组的博士后研究人员和学生。

有些人对原稿的批评也使我获益非浅, 尤其是米莉·阿尔瓦雷斯 (Milly Alvarez), 阿萨罗, 克里斯特 (Carol Christ), 克拉伊斯 (Philippe Claeys), 卡纳 (Dan Kanner), 萨尔策 (Rudy Saltzer) 和尤金·苏梅克。最费心力和最详尽的评论来自马勒, 他以超出友谊的情谊帮助我改善了本书的结构, 润色若干疏忽之处。我的画家朋友佩雷斯 (Vincent Perez) 细心地讨论了怎样一种剧烈撞击看来会像一头极其不幸的恐龙目击的景象, 并为本书画了护封。

同普林斯顿大学出版社合作至感愉快, 顾问费希尔和前科学编辑、现畅销书作家特纳 (Edward Tenner) 几年前就开始同我谈论写作一本书的计划, 现任科学编辑雷普切克 (Jack Repcheck) 最终说服我撰写大撞击的故事, 并巧妙地指导这个计划实施。

《霸王龙和陨星坑》的出版要热忱感谢三类人群: 第一类是我的科学界同事, 全世界范围内在各个方面讨论生物灭绝的科学家们, 他们对此作出了我所能想像到的最激动人心的智力探索; 其次是加利福尼亚州的公民们, 是他们雇请我在他们辉煌的大学里向他们的子女讲授地质学; 最后是我的同胞, 他们用自己的纳税, 通过诸如国家科学基金会和美国国家宇航局这样的机构支持着美国的研究计划。我希望他们能从本书讲述的发现故事里得到乐趣。

从首次发现恐龙灭绝时的大撞击证据起,就潜心于这项冒险的研究,这正是我的幸运。

——沃尔特·阿尔瓦雷斯

早期的大多数地球研究者是灾变论者。后来地质学家们发现,地球表面的地貌特征可以用时间跨度极大的渐进的变化来说明。今天,正出现一种较为开放的观点,它兼顾渐进论和灾变论,使两者不再互相排斥。



本书介绍科学家们如何揭示出地球过去曾经发生一次巨大灾变的证据,它是 6500 万年前来自外空的一块巨岩,在墨西哥的尤卡坦半岛上撞出一个巨大的陨星坑,并造成地面环境极度混乱,以致很多种类的动物和植物永久地灭绝了。在这次剧变中,最著名的牺牲品是巨大的食肉动物——霸王龙。



哲人石丛书

立足当代科学前沿

彰显当代科技名家

介绍当代科学思潮

激扬科技创新精神

策 划

潘 涛 卞毓麟

图书在版编目(CIP)数据

霸王龙和陨星坑:天体撞击如何导致物种灭绝/(美)阿尔瓦雷斯(Alvarez, W.)著;马星垣,车宝印译. —上海:上海科技教育出版社, 2001. 7

(哲人石丛书·当代科普名著系列)

书名原文: T. rex and the crater of doom

ISBN 7 - 5428 - 2564 - X

I . 霸…

II . ①阿… ②马… ③车…

III . 恐龙 - 关系 - 陨石冲击 - 研究

IV . Q915.86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 033312 号

沃尔特·阿尔瓦雷斯,美国加利福尼亚大学伯克利分校地质学和地球物理学教授,美国国家科学院院士。

这个故事富有戏剧性而令人恐惧。虽然经历 6500 万年的漫长过程,它已十分久远而淡漠,但堪与该事件的历史价值相比的是,地球史学家们如何发现这一大撞击的岩石记录,并学会解读与阐释这一证据的故事本身充满着人文价值。

整个 20 世纪,物理学、化学以及现在的分子生物学在认识自然界方面,通过分析的方法已经实现了巨大的飞跃。到 21 世纪,科学将开始把各个分科的知识综合在一起,以求得综合地、全面地了解自然界。地球科学天生具有综合性,因而当仁不让地被推上领导这一发展潮流的地位。研究撞击事件和生物灭绝的故事详细地阐明了这一切是怎样发生的。

——沃尔特·阿尔瓦雷斯

目 录

序 言

第一章

大劫难

1

第二章

由岩石天书解读地球史

17

第三章

渐变论者对灾变论者

41

第四章

铈元素

57

第五章

寻找撞击地点

81

第六章
致使恐龙灭绝的撞击坑
107

第七章
奇克苏鲁布事件后的世界
133

注 释
151

第一章

大 劫 难

但是,已经太迟了。在那一瞬间,岩石战颤,大地震动。震耳欲聋的巨大轰隆声以前所未有的巨响滚落在大地上,并回响在群山之间。接着一片巨大的红色闪光突然出现,越过遥远的东方群山之外跃入天宇,照亮低空云层,成为一片深红色。在那幽暗阴冷的山谷中,致命的光亮似乎变得更为剧烈和强劲。石质的山峰和山脊像利刃一样突然刺入反衬出戈尔戈罗思方向朝上冲腾的火光的完全黑暗中。接着是一阵巨雷的轰隆响声。

——托尔金(J. R. R. Tolkien)*:《恶党之魁》

一个消失了的世界的弥撒曲

让我们尝试想像一个不同的世界,它与我们所生活于其中的世界虽不相同,但并不像科学幻想小说中描述的那样:在没有空气的行星上,或在一个巨大的宇宙飞船中。我们寻找的是一个很像我们本身所拥有的世界,但有微妙的差别。托尔金在《恶党之魁》一书中描述了这样一个世界,它有像我们地球上的群山、沼泽和平原,但在地理上稍有差别——颇像欧洲,但不完全相同。托尔金的《中古地球的第三代》中有着像

* 英国作家(1892~1973)。——译者

人和马这类我们熟悉的居住者,但其他我们熟知的动物如狗和猫却消失了。中古地球也有不熟悉的居住者——侏儒、小精灵、男巫和妖怪。中古地球还有长着凶残的利爪、名唤奥克斯(Orcs)的小妖而使人恐怖。托尔金书中所描述的世界似乎是古代遗存下来的,或许是我们的世界的另一种选择。

我们寻找的世界使人联想起托尔金的中古地球,这个世界有群山、众多沙漠、森林和海洋。地理布局有些地方像我们地球,但有显著的差别。它有众多的河流和峡谷,高原和沙丘。它有在群山中的急风骤雨,还有雷雨过后出现在晴空中的美丽日落景象。这个世界的有些居住者似乎是我们熟悉的生物,虽然并不完全像我们所知道的生物那样。常绿树和落叶树造成有树荫的景观,河溪中充满鱼类,但是地面上草原却很稀少,动物看起来是不同的,小型的毛皮动物被证认出是哺乳动物,但也存在巨大的动物,有些安静地嚼着青草,而另一些则像中古地球里某些骇人的怪物,用它们的利爪捕猎食物。

这个世界和我们的世界是不相同的,是有差别的,但通过博物馆复制的一些标本、绘画和影片,它变得令人耳熟能详了。因为它不是中古地球的第三代,而有点像中生代的第三个纪。地质学家们把中生代这个术语用于恐龙生存的年代,中生代的第三个纪是白垩纪,在三叠纪和侏罗纪之后。

更准确地说,我们正在想像的这个世界就是在白垩纪的极晚期,在6500万年前。它是我们现在这个世界的祖先,具有不同的但还是常见的地理特征,因为大陆漂移从那时起使地球陆地板块到处移动,但没有完全地重新排列它们,印度板块还没有和亚洲板块相撞而隆起喜马拉雅山脉,但在北美洲西部已经存在山脉,海平面比今天的要高,北美洲的部分内陆被浅海所覆盖。

那个世界不但是我们的世界的祖先,而且在某种意义上,

它是我们的世界的另一种选择。因为它是个稳定的世界,虽然有食肉恐龙的凶暴的猎杀和霸王龙与三角龙之间剧烈的争斗,但生命的形式和居住者本身在 1.5 亿年期间仅仅缓慢地变化着。恐龙是非常兴旺发达的大型动物,与同样兴旺发达的小型动物和各种各样的植物共享这一世界。有各种理由相信,如果那个世界毫无损伤地保持着,中生代世界原本能无限期地延续下来,那么,在仅有微小进化的恐龙后裔所统治的世界中,永远也不会出现人类。

但是中生代世界不能安然无恙地保留下来,它突然地、毫无预兆地于 6 500 万年前结束了。大量的高度兴旺发达的动物和植物物种突然间以大灭绝的形式消失了,没有遗留下后裔。这种生命史上的中断留给人们深刻印象,致使地质学家们用它来界定白垩纪(中生代的最后一个纪)和第三纪(新生代的第一个纪)之间的界线。今天的世界则繁衍着在使白垩纪世界终结的那场大灭绝中幸存下来的物种的后裔。

回顾那个将我们从白垩纪分离开的时间深渊,我们不知怎样才能感受对久已失去的世界、一个有着它自己的韵律和和谐的世界的怀旧之情。当我们考虑到它的动物和植物,鱼类和鸟类——白垩纪的动物以及植物的大部分均不可复现地永远消失的时候,我们感觉到一种特有的悲伤,当我们想像到在那个世界的最后一个黄昏,西方的整个海洋上落日使云彩染上橙色、红色和黄色以及金色的时候,我们会感到更加悲伤。因为白垩纪世界永远逝去了,而它的结束是那样突然和可怖。

劫难的来临

导致生物灭绝的祸首来自天外。是巨大的彗星或是小行

星？我们还不能肯定它到底是什么。一个大小约 10 千米、以每秒几十千米的速度运行的天体，它的动能具有上亿颗氢弹的破坏能力。如果是一颗小行星，它是一块无生命的有陨击坑痕迹的巨石，暗黑且阴险，那么，在它撞击到地球之前是无法看见的；如果是一颗彗星，它是个脏冰球，受到太阳的热而沸腾汽化，会蒸发出气体，那么它会以发亮的彗头和美丽的彗尾炫耀于半个天空，照亮了黑夜从而预示即将发生毁灭之灾，最后当大劫难临近之际，甚至在白天都可看见它。让我们设想它是一颗彗星，不过要记着它也许是颗小行星。在从前，彗星曾被人们错误地解释为灾难的先兆，是饥荒、瘟疫和破坏的预告。虽然没有人目睹 6500 万年前的大彗星，但在当时情况下，它的确是个灾难的前兆。

太阳系富含彗星和小行星，有些甚至比在 6500 万年前曾接近地球的那一颗还要大。大多数小行星保持在位于火星和木星轨道之间的小行星带中，大多数彗星则在远于冥王星的距离处围绕太阳运转。然而，很偶然地，一颗小行星的运动轨道会因木星的引力拖拉而发生偏离，或者一颗彗星的轨道会被一颗路过的恒星的引力拖曳而改变。少数这类小行星和彗星会转向进入一种与地球轨道相交的轨道上。当这样的一个小天体穿越地球的轨道而地球刚好位于两轨道的交点时，该天体就会与地球发生碰撞。这就是每次您看见的一颗流星闪亮划过夜空的情形。这些闪光是由于彗星碎屑或小行星的碎屑在地球大气中因摩擦而燃烧造成的。略大一些的天体，如像拳头大小的，在地球大气中不会完全燃烧净尽，而是缓慢地降落，足以继续撞击到地球的表面上。这些天体便是陨星，它们被陈列在博物馆中，并被对地外岩石感兴趣的地质学家们加以研究。¹

大撞击也能够发生在太阳系历史的早期。古老的充满累

累陨击坑痕迹的月球表面可以证明,大撞击是频繁发生的。不过,大撞击在现代却比较稀少,因为在太阳系早期曾是很丰富的残余物质颗粒已经被大行星扫掠一空。现在能与地球相遇的大彗星和小行星则更为稀少。地球是非常小的目标。为了看看它多么小,不妨在金星是“昏星”的时候,于日落后看看金星。金星的大小和地球相差无几,从我们地球这一距离看去,金星是天空中一个很小的明亮的光点,是个非常难以击中的目标。

这样一来,大彗星和大的小行星很少能进入内太阳系这一事实成了地球的保护伞。击中像我们行星地球这样小的目标似乎是不会成功的,于是我们可以想像一下6500万年前大彗星在几个世纪或者几千年的期间内反复不断地来到地球近旁的情景。当它围绕太阳运转时,有时远离地球;有时十分接近地球,足以造成夜空中出现的蔚为壮观的天象。在地球史中像这种近距离却未能中鹄的情形必然是经常发生的。不过通常是彗星击中太阳或者击中另外的大行星,或者离开内太阳系。然而在特殊情况下,会有这样一个时刻,那时入侵的彗星穿越地球的轨道,恰巧彗星和地球两个天体都接近轨道的交点。这一次,撞击就难以避免,彗星向北美洲的南部——浅海和海岸平原(它现在是墨西哥的尤卡坦半岛)撞去。

毁坏程度的估量

评估一个即将发生的大撞击是非常困难的,因为这样一类极端事件是远远超出我们的经验范围之外的——对此我们要感到极其庆幸!谁都能够写下来这偶然发生的事件的破坏程度,这一事件是,一个直径大约10千米的天体²以大约30千米/秒的速度³猛烈击中地球。但是,这些估量只有当我们

试图见识一下或作某种类比以帮助我们理解时才有意义。我们想像一下一个直径有 10 千米的彗星会是怎样的呢？它的横截面的大小大致和旧金山城的大小相匹敌，如果能够把它轻轻地放到地球表面上，那么它比珠穆朗玛峰还要高，珠穆朗玛峰海拔高度大约只有 9 千米。它的体积可与整个美国的全部建筑物的体积相比。它是一个巨大的岩石，或是一个巨大的冰球，但尺度之大却并不超出我们的理解力。

它的速度使它成为一件剧烈可怕的武器。据估算，30 千米/秒的撞击速度是在高速公路上行驶的汽车所具有速度的 1 000 倍，是大型喷气客机速度的 150 倍，比在岩石中传播的地震波速度约快 5 倍。当以这样高的速度发生一次碰撞时，我们的经验已不中用了。岩石材料失去了我们过去习知的性态，而是产生出一种冲击波，一种在岩石中的声震。来自这一碰撞的冲击波挤压和压碎撞击天体和被撞击靶岩是如此强烈，以致冲击波通过之后，未被压碎的岩石四散飞离，或者熔化，或者甚至汽化。岩石在瞬息之间沸腾成蒸汽，表明撞击期间发生了无比寻常和极为剧烈的情况。

科学家们立刻要询问：一个飞近的天体的能量有多大？因为能量是自然界通用的用来计量使物体到处运动和引起变化的能力的量。⁴ 对于能量的转移，自然界运行一种自动化的簿记制度，要求飞进来的彗星的动能全部换算成在碰撞时所造成的各种损失的总量。当我们做这种簿记时，我们发现彗星在碰撞前的动能刚好等于百万吨 TNT 炸药爆炸当量的 1 亿倍，足以使彗星在大约一秒钟的时间内汽化掉，于短时间内在地面上炸开一个深 40 千米的大洞，但很快又坍塌为一个直径 150~200 千米的较浅较广阔的撞击坑。为了得到这一能量量值的感性认识，要记住一枚巨大的氢弹拥有大约百万吨 TNT 爆炸当量，在冷战高潮时期，全世界的核武库有 10 000 个

这种氢弹。因此,造成白垩纪终结的有1亿个百万吨 TNT 爆炸当量的彗星,等价于世界上全部核武库的爆炸当量的10 000倍(虽然撞击产生的爆炸并不是核爆炸)。

话题再回到直径有10千米、以30千米/秒的速度飞近地球的彗星上来。我们可以得到这一事件发生会有多么快的感性认识。一个大型客机在大约10千米的高度上飞行,于是可以想像一架飞机很不幸正在飞来的彗星的路上,在顷刻间这架飞机会像一只小虫一样被猛冲过来的天体撞得粉碎。三分之一秒钟过后,携带着不足道的飞机残骸的彗星的前部撞击到地面,产生使人目眩的闪光,并在彗星和地面中引发冲击波。另一个三分之一秒钟后,彗星的后端就穿入地平面以下。在飞机消失之后的一二秒钟,在地面上就会有一个巨型的、在增大着的、炽热的洞穴,以及一个由岩石汽化形成的膨胀着的火球。爆炸而喷射出的岩石残屑则穿过在它们到达地球四周各点的路径上的大气。在比阅读这句话所用的时间还少的短暂时间里地球遭受了强烈的损害。

我们对终结白垩纪世界的那次撞击的规模有了一些判断了,现在让我们对所发生的事去看看我们的流行然而并不完善的认识。

撞击的瞬间

6 500 万年前飞近地球的彗星,首先要遭遇地球表面之上好多千米厚的稀薄大气。大气的百分之九十五左右位于30千米的高度以下,于是彗星仅用一二秒钟就穿过大气层的大部分(视彗星的速度和入射角度而定)。彗星前端的空气,不能逃避开去,会受到猛烈的压缩,产生出一种在这个行星上曾经听到过的最强大声震。压缩几乎一刹那间便加热了空气,

直热到温度达到太阳温度的4~5倍,在穿过大气的一秒钟内发生白热的闪光。

在同地球表面(现尤卡坦半岛所在处)接触的瞬间引发出两种冲击波。一种冲击波穿过地表附近厚3千米的石灰岩层,向下进入在下面的花岗岩地壳,冲入基岩。猛冲来的冲击波向前疾冲过基岩,压实全部裂缝和孔隙并破坏了矿物的大部分有序的晶体结构。

同时,第二种冲击波突然向后掠过飞冲而来的彗星。在这个撞击者的后部反射开来,它会撕裂开彗尾的边缘。在发生这种情况的大约一秒钟后,此彗星不能再认为是一球状天体了。由于彗星的巨大的动量,驱使彗星冲向前方,彗星深深穿入尤卡坦基岩,冲开一个巨大的洞,并把彗星本身铸造成为一层灼热的覆盖层,堆积到正在变大的洞的内部。该洞现在已扩展为一个不断扩大的撞击坑,但在撞击坑内部之上的彗星物质覆盖层仅保持片刻,其大部分立即随着原来被撞击的靶岩的大部分一起汽化了。

当迅速汽化着的彗星残骸被夹带着向前冲进正增大的撞击坑时,弯向后方的冲击波到达撞击坑表面并溅射出一些喷射物(被撞击的靶岩的熔融碎块和固体碎屑),喷射物向上和向外沿一高高的弓形轨迹抛掷出去,穿过地球大气的稀薄的外缘到达地球大气之外。这些碎屑降落回地面,便落在撞击坑边沿几百千米以内,构成一个巨大的喷射物覆盖层。

这并未耗尽入侵的彗星的全部势能。在撞击中心处产生的汽化岩石所形成的巨型云,被它自身的热和压力向外推成一个巨大的火球。相比较而言,较小的核弹爆炸产生一个热气体火球,它突然闪亮向外推进达到直径1千米左右,直到它因大气压力的抵抗而不再能推进到更远的地方,然后漂浮向上达到10千米的高度,在那里它扩展开来成为一个蘑菇云。

规模大得无可比拟的尤卡坦撞击造成的火球,逐渐淹没地球大气,爆发着径直穿过整个地球大气层,膨胀开来并加速朝外进入太空,同时发射众多岩石粒子进入远远围绕地球的轨道上,直到这些岩石粒子落回到地面。

打造火球的进程还要继续下去。甚至当岩石蒸汽形成的火球被吹走进入外空,第二个火球也会接踵而至,它虽不如第一个火球那样炽热,但差不多像第一个火球那样迅猛。尤卡坦撞击坑处于地表以下约3千米,被一厚层石灰岩所覆盖。石灰岩是自然界储存二氧化碳气体的方式,即与钙结合在一起,使它们成为固体。受冲击的石灰岩突然释放出它所储存的 CO_2 ,在一次像这次一样大的撞击中,大量 CO_2 气体几乎顷刻间被释放出来,就像在一个巨大的香槟酒瓶上的软木塞突然爆裂开来。还有更多的岩石残屑被夹带在这个第二次爆发的气体球中,也穿越地球大气而进入外空。

此时此际,扩大着的撞击坑达到了约40千米的大深度。这个半球形的“暂时的洞穴”太深了,相对软弱的地壳岩石支撑不住它,于是,甚至当坑洞周边还在继续扩大时,其中心开始抬升。当坑洞陡峭的外壁坍塌成巨大的山崩之际,来自花岗岩的地壳之下地幔的深层岩石在冲击波经过之后反弹,越来越快速地向上升升成为一个中央峰,就像保持在月球上许多环形山的中央峰那样。尤卡坦撞击坑的中央峰是这样大和这样高,以致它依次坍塌下来向外成为一组环形山脊,形成一个样式很像靶心的地形遗留在地球上,标示着这一剧烈撞击事件发生的地点。

毁灭作用的表演场

在基岩被熔融或汽化的地带没有任何生命能够幸存下

来。甚至在距撞击中心(爆心)几百千米以外,生命也必然是几乎全部被毁灭。来自冲击波压缩空气和来自岩石蒸汽的火球的强烈光线造成的杀伤,当岩石中的孔洞和裂隙被经过的冲击波猛击压实时造成的压挤,加上下落的喷射物覆盖层的岩屑轰击,使得在这个中心地区很少有或根本没有活的东西留存下来。

在几千千米之外,在现在的墨西哥和美国境内,尤卡坦大撞击发出毁灭的戏剧性预兆。恰好生活在地平线上的动物首先目击到天空中的闪光,接着是片刻的沉寂,然后当大地开始因地震波的经过而难以控制地摇动时,天空本身也变为致命性的了。从微弱的光辉开始,接着天空变为越来越艳红,经过白热阶段,变得越来越亮、越来越热。马上地球表面本身成为一个巨大的烤箱——烤着、炙着、烧着,烧死全部树木和那些没有在岩石底下或不在洞穴中躲避的动物。这个可怕的现象是由大撞击炸毁而进入太空的弹道上的喷射物颗粒所引起的。这些颗粒现在落回地球,重新进入大气,因与空气的摩擦而变热,并以红外光的形式将热量传送给地球。⁵ 只有那些恰好被厚厚的雷雨云所笼罩的地方才能避免这致命的灼热。整个森林被烧毁,大洲规模的野火横扫大地。大火从大气中夺走了氧气,烧尽了森林,当大火造成的烟柱上升而使天空变暗时,喷射物颗粒几乎不再落回地球,而致人死命的白热的天空又恢复正常。⁶

当森林处于燃烧状态时,另一可怕的灾难降临到墨西哥湾的海岸。撞击发生在位于海湾一侧的浅水和海岸平原中,但由于地震的震颤,大撞击在深海湾的水中产生一个巨大扰动;由于地震波以及喷射物覆盖层向海中降落,引起了海底山崩。结果造成一次巨大的海啸⁷——一种高度几乎有1千米的大波动,它以可怕的速度向外扩展开来横扫墨西哥湾。平

常的波动不会扰动像墨西哥湾这样的深海底部,该处是地球上最安静的地方。但是大撞击造成的海啸竟是这样强大,它的“脊棱”(底部)足能横扫墨西哥湾的底部,在海底从海槽掘凿出许多细小沉积物,并将大撞击所造成的刚好落下的岩屑和这些海底沉积物混和在一起。当海啸波前到达佛罗里达浅水域和墨西哥湾海岸时,它被推升得越来越高,成为一道水墙高耸在海岸线之上。当这一大洪水冲向海岸时,它不仅冲毁整个森林,而且它还使大陆的边沿发生如此剧烈的震动,致使大量沉积物流动成为海底崩塌,它们向下流入深深的墨西哥湾里,掩埋了那些大撞击所造成的刚刚落下的岩屑。

在大撞击发生的时间里,墨西哥和美国的大部分必然因最可怕的、恼人的破坏而沦为一片不毛之地。而仅仅一天以前那里还是一片丰饶的景观,充满各种各样的动物和植物,现在则成为一个巨大的冒着烟在燃烧着的地狱,幸亏笼罩在搅混的烟尘所形成的黑云中而不得见。

距离尤卡坦地区更远的地方,影响不怎么强烈了,巨大的海啸被大大地限制在封闭的墨西哥湾里而不能到达亚洲、非洲或者欧洲。撞击产生的喷射物颗粒降落在环球各处,但只有很少的颗粒能够达到更遥远的地区,因此,大火可能就不如在北美洲那样强。与遭受极大杀伤的接近撞击中心地区相对比,遥远的大陆可能会避免尤卡坦撞击事件的直接影响。在这些遥远的地区,由于大撞击次级效应所造成的悲剧之展开要缓慢得多。

酸雨肆虐

像大撞击所产生的瞬间而直接的影响那样可怖的后果发生在大撞击的周围地区,但这些影响本身或许不能造成植物

和动物整个物种的永远消失,因为在遥远地区的幸存者还会在未来的年代在遭毁坏的地区繁殖。还有一个更大规模的毁灭紧随在大撞击之后,我们现在理解到,某些长期的全球性的灾害是大撞击的次生后果。按其出现次序,让我们来观察一下酸雨的形成。

在大撞击的几天以内,即刻发生的直接影响已经渐渐停息,大火可能会熄灭。海啸在墨西哥湾的海岸面前耗尽了它的力量,飓风也恢复平静,但是地球却变得寒冷而黑暗。大量的细小的尘埃曾经穿过大气闯入火球,而现在尘埃正穿过全球的上层大气沉降,同时遮挡着阳光。大地变得这样黑暗,你甚至不能看见在你面前的手。这种黑暗及与之伴生的寒冷可能持续几个月,直到最后大部分尘埃沉降到地面为止。⁸

但是在恢复光明之后,天气又走向相反的极端。从大撞击发生的地方释放出大量的两种温室气体(水蒸气和二氧化碳)。水蒸气可能以降雨(它能清除尘埃)的形式快速地从大气中移去,二氧化碳则只能缓慢地从空气中移走,现在它捕获太阳的热量,使温度提高到酷热的程度。二氧化碳可能要等几千年以后才能退回到正常水平。

不但水和尘埃如雨般从大气中降落到地上,而且还有一种具有毁灭性的酸雨。⁹ 酸雨中有些可能是硫酸,从硬石膏(一种与尤卡坦地区的石灰岩处于不同地层之间的沉积岩)中的硫得来,但多数是硝酸,来源于大气本身。我们呼吸的空气,约百分之二十是氧,其余的主要是氮。通常情况下,它们以两个原子的氧分子 O_2 和氮分子 N_2 的形式存在。氮形成紧密结合在一起的非常稳定的分子,只有当空气被猛烈加热时,氮分子才分解,允许一些氮和氧结合成为一氧化氮分子 NO 。在大碰撞事件发生期间,那时空气被冲击波、被火球、被喷射物再落入大气时的摩擦作用而加热,就会大规模发生氮和氧

相结合的情形。大量的一氧化氮被形成了,它们和大气中的氧和水蒸气发生反应形成硝酸 HNO_3 ,它们从天上滴落到地面杀死植物和动物,并溶解了岩石。

一个起先是黑暗和冰冻,然后是致命的炎热的世界,一个被酸雨和烟灰毒害的世界,这是尤卡坦大撞击的全球性后果。我们觉得奇怪,在这种环境下某些生物怎样能够幸存下来。然而,却存在着幸存者,并且它们的后裔生活在今天的世界里。

罹难者、幸存者和后裔

在大撞击事件之后许多年或几世纪,到大撞击引起的天然性毁坏已消失之时,地球上的生物圈发生了永久性的变化。许多植物和动物的整个种族均消失了,永远不会再看到了。据估计,大撞击时代的生物的物种有一半消亡了,这是我们所知地球过去发生的五次大量生物灭绝中的一次。要了解什么原故造成任一特定植物或动物的种族的消失是很难的。曾经作过一些合理的推断,但在许多情况下我们大概将永远也不会有把握地知道详情。编制一份罹难者和幸存者的名单却是不难的。

当然,最为著名的罹难者是恐龙。不但霸王龙和其他大型食肉恐龙、食草恐龙,而且它们的亲戚,像会游泳的沧龙,或者会飞行的翼手龙,都消亡了。现在大多数古生物学家们认为现代的鸟类是和某些恐龙关系极为密切的,就这点而言,它们是在白垩纪末幸存下来的。¹⁰但是最新发现的化石却显示出鸟类几乎也是彻底毁灭的。¹¹

恐龙的消亡可能和它们处于食物链上的位置有关,因为食草恐龙吃植物,食肉恐龙吃食草动物,或许还吃小型哺乳动

物。在由于大气中烟尘笼罩造成的寒冷和黑暗降临的几个月内,植物会枯萎凋谢,食草动物会饿死,轮下来食肉动物也会饿死。大型动物从来不会是很多的,尤其是顶级食肉动物,因此它们应特别易于灭绝。

许多较小的陆地动物会幸存下来,包括哺乳动物,也包括爬行动物,像鳄鱼和龟类。没有人真正了解为什么这些动物逃脱了灭绝的厄运。较小因而数量更多的生命会增加幸免的机会,这可能也有助于解释鸟类能幸存下来的原因。

叶状化石证明陆地植物也经历过大量灭绝¹²。我们预期在大撞击时存活的独特的树木和灌木会在寒冷和黑暗时期毁灭,但是种子和根原本应当容许大多数物种在黑暗时期结束之后再度出现。许多种植物的灭绝还没有得到解释。

现在再把话题转到不太熟悉的海中世界。我们发现大撞击致使有螺旋状壳的螺类——鹦鹉螺的亲戚的绝种,它们已在海中兴盛了几亿年。¹³较不太知名的无脊椎动物群则在种、属一级的层次上大批消亡,可能它们是食物链崩溃的牺牲者,或者是它们的壳在变酸的海水中被溶化,不过,没有人知道究竟。

更不熟悉的是微小的单细胞的植物和动物,它们漂浮在大洋的水面上,这些微小的有机物是极其丰富、数量极多的,但却遭受几乎完全灭绝的命运。微小的光合海藻和叫做有孔虫的单细胞食肉动物产生大量的微小片状物和微小的甲壳,它们以不寻常的清晰度记录下生物大量灭绝的情形。¹⁴可能它们对黑暗和酸极为脆弱,它们又位于海洋食物链的基底,因而它们的消失毁灭着依赖它们为食的海洋动物,不论是有孔虫类还是光合海藻都处于严重的危急状态,很多或大多数亲属灭亡了,但两者都有少数几个种属幸存下来,并遗留下后裔,这些后裔在现在的海洋中很丰富。

地球上的植物和动物物种有一半突然消失,对我们来说几乎是不可思议的异常灾祸,它确实标志着世界的末日。但是,黑暗终于消退,灼热渐渐熄灭,酸也逐渐被中和。幸存者存活下来,它们发现自己处于一个在悲惨地变化着的、但对未来拥有无限生机的新世界中。1.5亿年来恐龙已成为地球上的大型陆地动物,而哺乳动物则被限定扮演小型动物的角色。随着恐龙的消失,哺乳动物拥有了新的机会,迅速进化成为大型动物。当我们认识到白垩纪世界是一个对于我们、对于大型哺乳动物来说没有生存地位的世界时,我们对消失的白垩纪世界的怀旧心情会有所缓和。我们对结束了白垩纪世界的大撞击造成的毁灭的恐惧会因这样的理解而有所减轻:只因有了这次异常的灾祸,进化才得以沿着6500万年后导致人类出现的方向进行。我们人类是大劫难的受惠者。

这一切我们是怎样知道的?

当然,托尔金的中古地球的故事是纯粹幻想。它有自己的内在逻辑,但是在中古地球发生的神奇故事永远也不能在真实的世界中发生。它是些美妙的故事,但是为了欣赏它,您必须暂停怀疑的意识。它不着意于以某种方式去描述那些曾经实际发生的事件。

关于结束了恐龙时代的尤卡坦大撞击的故事,则具有不同的宗旨。它刻意尽可能精确地重建那真实发生过的历史事件。它不要求它的读者暂停怀疑而是恰好相反,要求他们发挥他们的吹毛求疵的才能,去寻找出它的瑕疵,以他们能做到的任何方式来考验它并设法改善它的精确性。

但是我们怎样才能够重现在6500万年前发生的事件呢?很久以前,某些人曾经留意观察所发生的事并为后代记录下

来吗？我们能够重建这些事件是因为地球的历史在地球本身中被记录下来了。我们的行星地球的大部分历史是写在岩石中的。岩石是开启地球历史之门的钥匙，因为固体可保存记录而液体和气体却使记录失去。寻找这些长久失去的记录是地质学家们和古生物学家们的职责，是地球史学家们的职责。

理解我们是怎样破译写在岩石书中的一次伟大历史事件，可能如这事件本身一样有趣。对终结白垩纪生物灭绝事件的揭示过程，是一次坚毅的探测工作的奇异经历，是在世界遥远的地区探险的奇异经历，是寂寞的智力竞争的奇异经历，是长期遭受失败但最后突然以重大发现为终结的奇异经历，是建立友谊和失去友谊的奇异经历，是曾遭公众误解和翻悔而使人困窘的奇异经历，是有所发现的令人兴奋的奇异经历，又是对于一个脱颖而出的美妙故事感到欢愉的奇异经历。这就是在本书其余章节中我们将要探索的内容，即我们所看到的尤卡坦撞击的故事是怎样被披露和怎样被拼合补缀成的。

第二章

由岩石天书解读地球史

记录在岩石中的历史

近至 1975 年,发生在尤卡坦的撞击故事仍属全然未知。过去发生在我们行星地球上的一桩最具戏剧性的事件的主要情节已被彻底遗忘,在记忆中消失了 6 500 万年。这一丧失的记忆是如何恢复的呢?

我们出生后对以前所发生的事情自然并不知晓,是通过学习历史才找到克服这种“天然忘却”的办法。问询我们的父母亲和祖父母,他们就会记忆起并告诉我们大量不久前发生过的事件。以往历代的历史可以从很久前人们的原著和历史学家发表的文献上看到。通过印在纸上的文字符号,我们可以回溯历经 5 000 年的历史,阅读过去最早期的著作,我们知道了前人们的思想和事迹。

可是这 5 000 年的历史,只回溯到地球生命史的百万分之一的一小段时间。而决定进化出我们人类与我们所居住的大自然环境的事件,都发生在文字符号创造以前几乎无限漫长的古远时间里。只是到了最近的一两个世纪以来,我们才会解读这些湮没在被遗忘的永恒中的种种事件,并书写出它们的历史。

关键的发现是,历史被记录在岩石中。*Ex libro lapidum historia mundi*——由岩石天书解读地球史。多数人对植物和动物比对岩石感兴趣,因为植物与动物有生命和活力,而岩石

似乎既无生气又没变化。岩石实际上有变化,只因其变化缓慢很少引起人们注意,正是由于岩石具有这种近乎不变的迟缓变化特性,使它担当起了地球史的优秀记录者的角色。岩石记录着逝去的年代。

从考古学家的工作中最容易理解恢复蕴含在岩石中的记忆是怎么回事。古庙宇、古建筑和古城镇记录着很久以前逝去的古文明的活动,古玛雅文化就是曾经辉煌、后来衰落直到消失在尤卡坦莽丛中的一个古代文明,其遗址下面就埋藏着很早以前造成大灭绝的撞击坑。

全世界的考古遗址展示着记录在岩石中的历史的基本规律——较年轻的层次覆盖在较古老的层次之上。这就是地层叠加定律(叠覆律),它是全部地层学的基础。成层岩是从下到上层层相继沉积成的。当然人们必须注意某些例外之处,矿坑被向下掘进到较古老的沉积物中,然后填入了较新的材料,或挖空的洞穴又被填实。但这类足以导致错误的偶尔可能性正可以帮助地层学家们保持警觉!

在有数个世纪之久的考古遗址中重叠埋藏有丰富的古物样品。例如,在罗马,其城中广场保存着一层又一层的历史遗迹,在台伯河的古老沉积层上覆盖着古罗马的早期遗迹,然后是共和政体罗马时代的粗犷建筑残垣断壁,以及罗马皇帝的庄严纪念碑。从中世纪到近代,罗马保留有多层遗迹,往往有阶梯从今天街道的地面向下一步步引到一座古教堂的入口处。每座古城在地下都埋藏着层层遗存。

在各处的石头建筑上的岩石中,以更加详细的程度记录着历史。罗马北部的亚平宁山脉之中,美丽小城古比奥的一系列高贵的中世纪石塔、教堂和宫殿静静地沉睡在那里度过了几百年。我曾经在古比奥附近的群山中花费了好几个月进行地质研究,不知疲倦地穿过该小城的街道散步,注视那些中

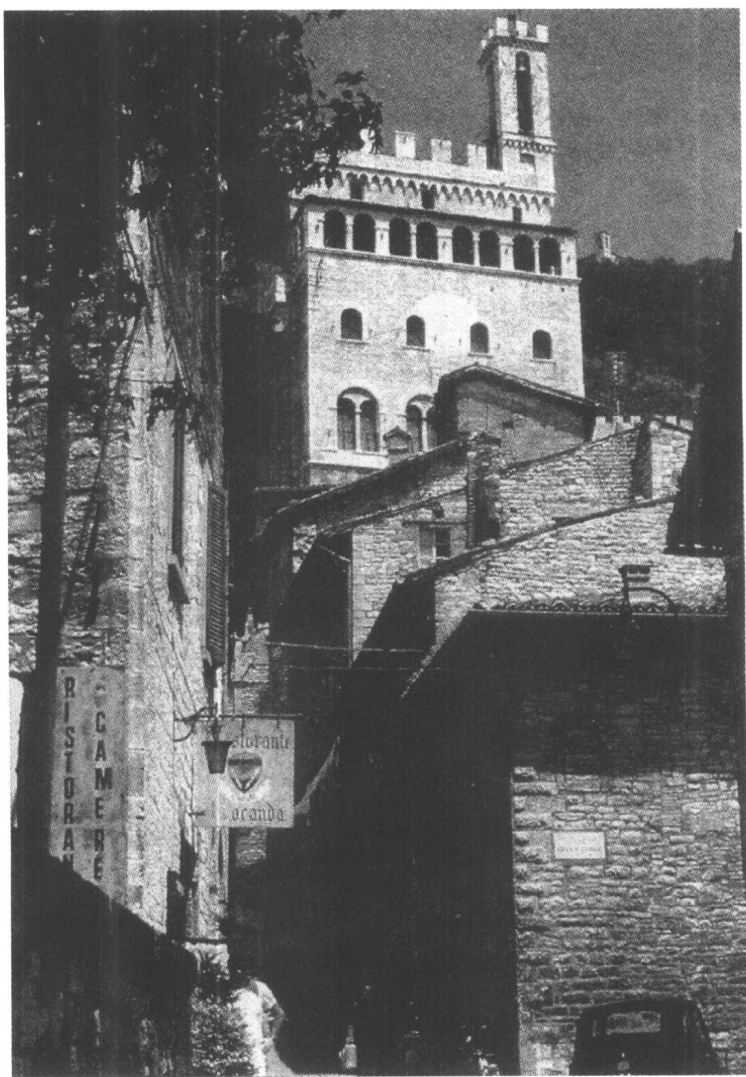


图1 古比奥的中世纪建筑物——康索利宫。

世纪的建筑。整座小城就是一部写在石头上的史书,就近仔细考察,就会发现在建筑物与重建物的细节上所据有并保存下来的历史情节。譬如:在古比奥,尖角的哥特式窗户到处可见,但这些窗户往往被砌死,而随后又在不同位置上开凿出不同形状的窗户。人们告诉我说,高贵的建筑的这种悲惨毁损记录着对窗户的强制征税史。一些房屋主为了逃避纳税选择了把窗户砌起来的办法,后来终于废除纳税时,由于窗户的原来位置早已忘记,或其室内已有所改变,或许是哥特式窗户不再时兴,于是就遗留下现在这种景象。对中世纪感兴趣的人和对记录在石头上的历史留意的人,古比奥就是他们的一处地上乐园。

阅读地球的历史

由于人们习惯于建筑物,并且可能亲手建造了它们,所以记录在石墙上和埋藏在考古废墟中的人类历史较容易被我们大多数人掌握。人们对记录着人类出现以前发生的各种事件的岩石并不如此熟悉,要学会阅读地球的历史需要花时间去研究和体验。而古比奥就是开始这项研究的一处极好场所。走出城墙后门,进入城后的群山之中,我们就能见到地球的历史是如何被记录下来的。

在后门外我们经过几个坐落在峭岩山边的石屋后,进入称作 Gola del Bottaccione(博塔乔内峡谷)的一个峡谷。意大利文“Bottaccione”的意思是“大水桶”,这是对一个建于 14 世纪从山泉引水入峡谷后流到古比奥的中世纪引水渠道所起的怪名。这条引水渠道沿着山腰在现代公路上方蜿蜒前行,在公路岔口处显出引人注目的淡红色岩石露头,叫作“Scaglia rossa”(斯卡尔亚罗萨)。意大利语“Scaglia”读音为“Scahl-yah”

(斯卡尔亚)。意思是薄片,表明这种岩石能容易地凿成美观的建筑石料。“Rossa”(罗萨)指的是红色。

停下来细心察看这斯卡尔亚罗萨,我们首先注意到它那排列成每几层的地层,每层厚 10 厘米左右,从古比奥向外倾斜成约 45° 倾角。这种斯卡尔亚红色岩石是堆积在海底的颗粒沉积物所形成的沉积岩,后来被抬升出海面造成意大利半岛。这种情况下沉积颗粒大部分为方解石矿物晶粒(碳酸钙, CaCO_3),它们所形成的沉积岩称作石灰岩。沉积岩大致堆积成水平向地层,因而 45° 倾斜表明这些岩层沉积后经受到倾侧作用。是造成亚平宁山脉的褶皱的形变事件使其出现这样的倾斜。这便是记录在岩石中的历史片段,它使我们研究范围超出了考古学,因为建筑物可能坍塌,却很难形成褶皱!

这些原始的淡红色斯卡尔亚石灰岩水平地层的连续厚度达 400 米,其上方和下方还有更多的其他颜色的石灰岩层。在这些地层中显然记录着大量的地球史料,但究竟是什么性质的历史呢?为了找到答案,我们敲下一块干净的斯卡尔亚岩石,用我们地质学工作者必带的手持小放大镜仔细观察,遍布于石头上的小小斑点这时可分辨成螺旋形、小室状的微化石。它们是些有孔虫的壳,这种生物原本是漂浮在深海表面附近的单细胞食肉动物,在霸王龙消失的那个大规模灭绝的同一时期,也差不多全部死亡了。有孔虫的存在表明斯卡尔亚岩石必定是海洋石灰岩。因为这里没有发现当时浅海中大量生存的无脊椎动物的化石,所以我们还能断定它是深水石灰岩。还因其中几乎找不到泥沙,又能判断出它是在远离河流入海口的地方沉积而成的。

或许很多人会发现这种海中的石灰岩不如沉积在干燥陆地上的沉积物有趣,我们人类终归是陆地上的动物,我们更加熟悉干燥的陆地和在其上所栖息的动物,而且一般说来对我



图2 古比奥的博塔乔内峡谷。中距离处的广阔山坡是白垩质的斯卡尔亚罗萨石灰岩。公路上方水平构造为中世纪的引水渠道。

们更有意义。可是海平面以上的陆地是侵蚀作用的主要场地,侵蚀弄平了丘陵和群山,移掉了过去堆积的沉积物。侵蚀破坏了地球史的记录。然而,深海底部几乎受不到侵蚀,因为波涛到达不了海底,而那儿的洋流慢而缓和,所以深海沉积物是地球史的理想记录器,而古比奥的石灰岩正是全世界最好的地球历史序列之一。

自从 20 世纪 70 年代中期认识到该处沉积岩的重要性以来,像我这样的地质学家每年夏季都来古比奥,来寻求有关地球史的许许多多不同问题的答案。正是在古比奥,大撞击的第一个暗示显露了出来,我们下面马上就要谈论这事。但是我们首先需要对远溯到人类出现以前的漫长时间长河有一个较深入的理解。

地球史的量度

人文史的学者确定过去的时间采取两种方式,他们有时给出用数字表示的年月日期,例如:“罗马于公元前 8 世纪立国,其最后一位被承认的皇帝在公元 476 年被废黜。”他们有时用的是人文史的著名时期,例如:“古比奥繁荣于中世纪的全盛时期,其建筑代表着意大利的哥特式时期。”

地质学家也采用这两种系统,例如:“6 500 万年前的尤卡坦撞击划分出白垩纪与第三纪之间的界线”。用这两种方式具体标定出地球过去的时期都须付出相当的努力才能变得习惯,因为对那些命名不够熟悉,而用百万年为单位的数字表示的时期,似乎不可想像地遥远。

在 200 年前地质学家刚开始认识到地球史记录在岩石中时,他们根据岩石的特性对可证认的地球历史间隔加以命名。许多命名被坚持使用是因为它们有用。正像一位艺术史家即

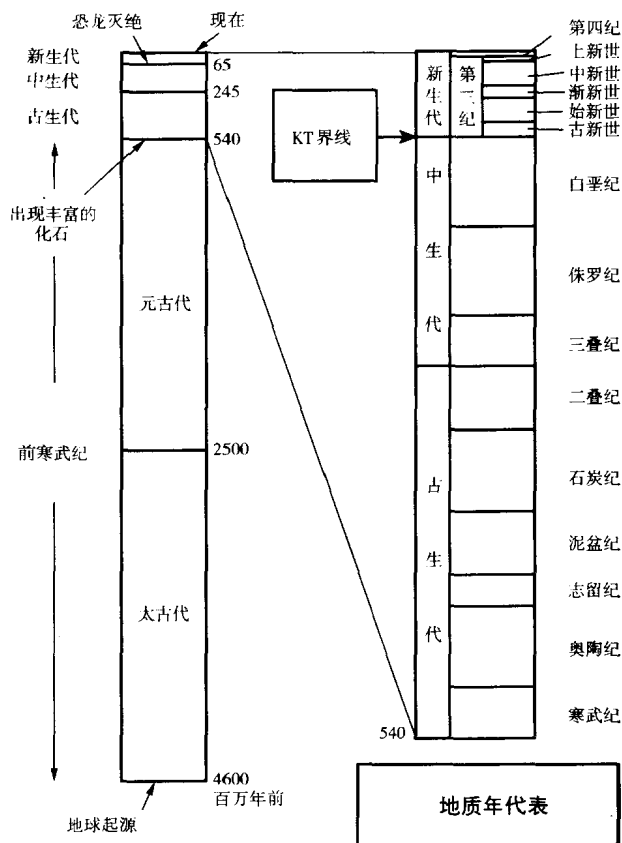


图3 地质年代表。这些是地球史上最重要的已命名的时间间隔。左栏时间从下到上为从古到今,代表地球的全部历史。右栏表示根据丰富化石所可能作出的最近12%地球史的较详细时期划分。

使并不清楚某个建筑物的确切建成日期,却能识别一处哥特式窗户。故地质学家也往往能从鹦鹉螺化石或有孔虫化石的存在指出一块岩石形成于白垩纪时期,即使是无法精确定出它的年代。

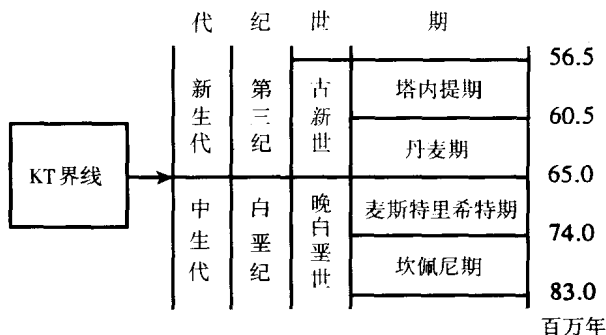


图4 地质学家将这些命名用于白垩纪和第三纪之间的界线前后相邻近的时间间隔,这个界线通常被称做KT界线。由左到右的排列为从较长时间间隔到较短时间间隔,且较古的时间间隔排列在底部。

KT 界 线

在上页给出了地质时间间隔命名表,但因我们本书只研究涉及6500万年前的大灭绝事件,所以只需要记住它所隔开的前后附近的时期命名,所涉及的命名如本页命名表。

术语“代”表示地球史上最大的时间划分单位。从“代”方面来说,尤卡坦撞击将中生代(“中期生物”,或恐龙生活年代)与新生代(“近期生物”,或哺乳类生活年代)分隔开。

较细些的次一级划分单位称做“纪”,撞击事件标志着白垩纪与第三纪间的界线。白垩纪的命名源于拉丁文“creta”,意指白垩。因为在中生代的最后一个或第三个纪,白垩沉积在广阔的浅海海域,故命名白垩纪。第三纪的命名是沿用着早期的观点,那时认为地球史可分为四个时间间隔,即第一

纪、第二纪、第三纪和第四纪这样四个时代。前两个名字已不再延用,但第三纪这个名字仍然保留,用在白垩纪末与冰期开始之间的一段时间,冰期被称作第四纪。地质学家用字母 K 代表白垩纪,源于同义词德文的“Kreide”,意思是“白垩”,并用 T 表示第三纪。白垩纪结束时的大规模灭绝标志着地球史上的一个重大转折点,终于被称作 KT 界线。

更细的历史分期专门术语叫做“期”。从“期”方面来说,KT 界线标志着麦斯特里希特期(白垩纪的最后期,因暴露在荷兰城镇麦斯特里希特周围的岩石而命名)的结束,和丹麦期(第三纪的最初期,因该期的岩石在丹麦暴露得最充分而得名)的开始。

理解远古的时间

对地球史上这些时间间隔的认识,只不过是一件努力记住一些不熟悉名字的事罢了。而要用数字估计它们的年代就比较困难,这是因为对于有幸也只能生活一个世纪的人们来说,数百万年之久的时间间隔远远超过了人的理解能力。地质学家也不比其他任何人更具备对如此漫长时间长河的直观理解能力。可是由于我们地质学家们知道在地球史上什么时候发生过什么事情,和知道哪些时期是地质学上的近代、哪些时期是地质学上的古代,所以地质学家能以亲切熟悉的体会谈论数百万年的时间长河。为了达到如此熟悉的程度我们需要做两件事——须把我们常用的时间单位从“年”改换成“百万年”,并须把地球史的基本分期以百万年为单位来回忆这些年代。

在考虑地球史时,其所以需要把时间单位由“年”转换为“百万年”,是因为用年数思考地球的历史,无异于用厘米计量

从墨西哥到意大利的旅程,或用秒来计算一个人的寿命。因此,我们在思考恐龙灭绝的年代时,不应去想一个庞大的年数(65 000 000 年!),而是去想一个小的数目,即 65 个百万年。

然后,我们需要一个察知那个年代处于地球史过去多么遥远的办法。有一件值得注意的巧合的事情对我们大有帮助。恰巧地球史约为有记录的人类历史的一百万倍长。约 5 000 年前发明了书写,而地球大约形成于 5 000 百万年前。¹这样我们通过与以年表示时期的人类历史的比较,就能够认识以百万年表示时期的地球史上事件的晚近或古远的含义了。第四纪冰期开始于 2 百万年前,它在地球史上所经历的时间,就像发生在两年之前的人类事件一样晚近。65 百万年前的白垩纪—第三纪界线,是地球史上相应于人类历史上 65 年前发生的事件,就像仍在许多人的记忆中发生的事一样。恰似人类历史上数百年前所发生的事件似乎在时间上实在遥远一样,地球史上好几百个百万年前所发生的地球变动事件才属于真正遥远的过去。

上述这些便是年轻地质学家们开始研究地球史时吸收的思想方法。熟悉时期命名,把以年为单位转换为以百万年为单位,渐渐就能辨别哪些时期相对地说算做晚近,哪些时期确属古远。

地球史的年代学

我们如何能做到将特定的岩石归属于地球史上被命名的时期,并能知道它具有多少百万年的年龄呢?利用地层叠加律,一般就能较容易地把年代的序列确定下来。在地质学作为一门科学的发展中,对时期的命名进行得较早,原本是根据该岩石中所发现的不同化石来确定的,二百年后的今天仍然

是根据化石命名。而确定其数字年龄有几百万年,这是直到20世纪才得以实现的成就,直到物理学发现了放射性现象和发明了复杂的分析仪器后才有了这个可能。

因为数字年龄与化石年龄一般出自大不相同的岩石种类,所以在我们给出完整的地球史年代学的能力上至今仍受到较大限制。² 给出数字年龄的大部分放射性矿物形成于由熔融岩浆到结晶为火成岩的高温时期,而化石却是在有利于生物的温度下堆积在海洋中或陆地上的沉积岩中发现的。

在弥补这个缺陷方面,把精确的数字年龄和根据化石命名的时间间隔之间的界线相关连在一起而建立地质年代表方面,地质学家只能缓慢地做出不断的进步。最直接的方法是寻找火山灰中的可测定年代的高温矿物,该火山灰是从遥远的火山爆发处吹过来的,在其堆积成地层的沉积岩中包含着化石。³ 另一个虽间接但很有效的方法是根据地球磁场的磁性倒转发展第三个地质年代表,地球磁场倒转记录在火成岩和沉积岩两种岩石之中。每过几年就会出版一本陈述地质年代学(即地球史的年代判定)知识当前状况的书。⁴ 古比奥的岩石序列在全部三种主要的地质年代学探讨方法中曾担任着重要的角色,在古比奥的时间标定工作直接导致了对KT界线上大撞击的证认。所以,让我们更密切地考察一番这三种测定岩石年代的方法在古比奥岩石序列上的应用。

用化石测定岩石年代

在普遍认为化石是老早生存的动物和植物的遗迹之前很久,人们谅必已经找到它们了。史密斯(William Smith)曾经是一位英国的水道工程师,他于1800年前后用了多年时间在沉积岩中挖沟,史密斯逐渐熟悉了他的工人们常找到的各种化

石,他辨认出在沉积岩中经历了漫长时间的化石以一种可识别的方式演变的情况。他认识到化石能够用来定出各种沉积岩的年代顺序,他还发现,相距遥远而年代相同的岩石可能是相互有关连的,自那时以来,这就成为地层古生物学的基础。

一个观察事实是,当我们向上穿越岩石系列时,保存在沉积岩中的动物和植物化石在演变着,在这个意义上,进化可以由细心地寻找和观察化石的任何人来证实。整个 19 世纪里,当演变着的化石序列被逐渐排列出来时,像白垩系和第三系这样的名称已应用于特殊年龄段的岩石上了。化石的演变原因在英国博物学家华莱士 (Alfred Russel Wallace) 和达尔文 (Charles Darwin) 说明它们是自然选择的结果之前是神秘难解的,正如我们将要看到的,达尔文强调所有进化都是渐进的。自然选择的进化学说风行了超过一个世纪之久,不过该学说的一些细节可能还需要改进。⁵ 本书的一个重点,就是达尔文所坚持的关于逐渐进化的论点如何由于认识到偶然灾变事件(例如,在 KT 界线大量生物灭绝时发生的尤卡坦撞击)对生命所造成的戏剧性后果而受到挑战。

海洋无脊椎动物的化石,如蚌类、鹦鹉螺化石以及珊瑚虫都曾经是 19 世纪最有用的测定年代的工具,因为它们在田野中容易找到,并且足够大,用肉眼就可研究。在 20 世纪中,古生物学家认识到极小的“微化石”的用途,这些微化石大量存在,并可被大量找到,甚至从那些未必会穿透珍稀大型化石的钻孔岩芯中都能找到。虽然为了研究它们需要一具显微镜,微化石却成为了 20 世纪中叶前所选用的测定年代的材料。

最重要的微化石是有孔虫类化石。这些单细胞的海洋有机物制造出微小的壳,每一种类的壳是互不相同的,在显微镜下能够精确地证认出它们来。大多数有孔虫类生活在海底,各种有孔虫出现在一种特殊的沉积岩中,因而主要反映出海

底的环境。但是有些有孔虫类像浮游生物那样漂浮在海洋的水面上。这些浮游的有孔虫类对于测定岩石年代特别有用,因为洋流会把新近进化的有孔虫种类快速地传播到全世界的海洋中去,因而当有孔虫死掉,它们的壳沉降到海底的时候,进化上的变化立即在全世界范围被记录下来。只有在深水中海洋沉积物是缺少有孔虫壳的,因为它们在深海的极寒冷水中溶解了。

直到 20 世纪 60 年代,古生物学家们才充分认识到保存在石灰岩中的几乎不间断的历史记录的价值。这些石灰岩沉积在中等深度的海底,被称为“深海的”石灰岩,以便和那种由生活在阳光照射着的浅水海底的有机物化石所形成“浅海的”石灰岩相互区别。这些沉积物积聚在最深的冲刷波底下的黑暗中,几千万年中不受扰动。许多白垩纪和第三纪时代的深海石灰岩同浮游的有孔虫类紧密堆积在一起,所以它们的年代能够详细确定。

1967 年初,被“格洛玛·挑战者”号科学钻探船取回的深海岩芯提供了关于地球史的大量信息。深海石灰岩不是全部都仍然淹没在海洋中,在少数地区,它们被推升出海平面之上并暴露在群山之中,因此能够提供给买不起钻探船但的确有长靴、锤子和手持放大镜的人们加以考察。但是对于地质学家们来说,要他们确信这些石灰岩露头是来自深水、具有深海的起源都要花上一段时间,更不要说重视它们作为地球史记录的价值了。

深海石灰岩的大规模露头是罕见的,能寻找到它们的极少数优良地区之一是意大利的亚平宁山脉,而且亚平宁地区的最好地点或许是在古比奥的博塔乔内峡谷。作为 20 世纪 60 年代米兰的一位大学生,席尔瓦(Isabella Premoli Silva)曾研究过古比奥的斯卡尔亚罗萨的有孔虫类化石,⁶学会证认它

们,虽然斯卡尔亚石灰岩是很坚硬的,且你不能得到完整无损的有孔虫类化石。许多古生物学家都善于证认那些松散的有孔虫类化石,而席尔瓦却是极少数在薄片(安放在玻璃载片上且碾磨到透明的岩石薄片)上就能够证认它们的专家之一。我们大多数人看到我们的朋友时都能够认出他们的头,但像席尔瓦对有孔虫能作到的那样,仅从轮廓来证认出一个人的头来却要困难得多。借助她对坚硬石灰岩中有孔虫的证认能力,并借助斯卡尔亚罗萨连续 5 000 万年的记录,席尔瓦在古比奥石灰岩中能够证认出根据在别处从软沉积物中取出的有孔虫化石建立起来的地层年代序列。

以百万年为单位的数字纪年

为了胜过根据所出现的化石建立起的古生物学的年代表和命名法,测定出地球史上的事件的数字纪年是有决定意义的。例如,在 KT 界线上的大灭绝就可用百万年为单位计量该是多少年以前发生的。

数字纪年的测定是建立在放射性原子衰变的基础上,在矿物中出现的少数元素有不稳定的核,它能够衰变为其他元素。这就给我们提供一个计时器,因为随着时间的流逝,矿物颗粒中的母元素会逐渐变为子元素,即子元素对母元素的比值在增大。无论温度和压力怎样变化,或者进行着什么化学反应,放射性衰变以永恒不变的速率发生着。于是,它提供一具非常可靠的计时器。铀、钍、镭和钷均是不稳定的元素而在逐渐衰变,但是确定沉积物年代序列的最重要的元素是钾,它衰变为氩。放射性钾的衰变速率已被测定出来。如果能够测量出母元素钾的含量和子元素氩的含量,就能够计算出一个样品以百万年为单位的年代。子元素氩对母元素钾的比值越

大,岩石就越古老。

实际上,这种放射测量测定年代是一件复杂而精细的任务,具有各种可能的误差。例如,氩是一种气体,而有时子元素氩在几百万年中会从一个样品中泄漏出来,从而使样品显得过于年轻。或者,如果有些氩在它刚形成时即被混入矿物中,那么,表观的纪年就将太老。但从事这一工作的地质年代学家们是非常老练的和有技巧的。现在,每年都发表许多精确的纪年数据。

我们现今对地球史的地质年代的理解部分来源于化石,部分来源于受化石信息制约的数字纪年。不过,显示地质年代的另外一个重要关键是研究地球磁场的倒转。这就是比尔·劳里(Bill Lowrie)*和我怎样涉猎地质年代表研究和我们怎样被引向霸王龙神秘灭绝问题上的起因。

化石罗盘和地磁倒转

比尔·劳里是一位来自哈威克南苏格兰城的地球物理学家。20世纪70年代初期,他和我大致在相同时间来到哥伦比亚大学海洋地理学和地质学实验室的拉蒙特—道尔蒂地质观测台。作为年轻的科研工作者,我们如饥似渴地寻找鼓舞人心的研究计划,我们开始共享研究理念。

我告诉比尔我对阐明意大利亚平宁山脉的起源问题有兴趣,我一直在那里工作,他告诉我应用古地磁学能够作些什么,他的专长是地球物理学。有些岩石含有磁性矿物颗粒,它们记录下当它们被沉淀为沉积物时或被冷却为熔岩流时地磁场的方向。这些磁性矿物颗粒的作用像是神秘的化石罗盘,

* 比尔是威廉(William)的昵称。——译者

而在实验室中,古地磁学家们能够读懂这些化石罗盘。

古地磁学在 20 世纪 60 年代的板块构造学说革命中曾经有决定性的意义,板块构造学说是大陆漂移学说的现代版本,它根除了所有大陆永远保持在固定的位置上的陈旧观点。如果像 20 世纪前半叶大多数地质学家相信的那样大陆从来没有运动,那么,在岩石中所有化石罗盘都仍应指向北方。古地磁学研究的先驱者们已经证明实际情况绝对不是这样。由于岩石形成以来,运动着的大陆不断转动,化石罗盘(残留下来的磁性)常常指向另外方向。

在比尔和我开始我们的研究生涯时,板块构造理论刚刚被接受,从早期的地磁研究至少已粗略地知道巨大的大陆板块旋转这一事实。曾经担任过利比亚一家石油公司的地质学家并在意大利进行过几年的研究工作之后,我变得对研究地中海的复杂地质演化(地中海的构造)感兴趣。它似乎牵涉比庞大的大陆板块要小得多的板块的运动和旋转。比尔和我开始谈论地中海构造,我们发现我们自己使用了“微板块”的术语,并且极想知道对它们的运动古地磁学能告诉我们些什么。我们认识到,如果在亚平宁形变时意大利的大陆地壳像微板块那样有过旋转的话,那么,在亚平宁沉积岩中,我们应当发现化石罗盘已旋转离开原来的指向,不再指向北方。

于是我们作了一次旅行去收集亚平宁的岩石,携带着各自的妻子米莉(Milly)和玛茜娅(Marcia)作为跑野外的伴侣。在日晒雨淋的日子里,我们来回奔走于山间采取斯卡尔亚罗萨样品,因为它的锈红色的颜色标志着氧化铁矿物——赤铁矿的存在,而赤铁矿能够记录地球磁场。一部分时间我同我的朋友琴塔莫雷(Ernesto Centamore)一起工作,他是一位魁梧的意大利人,对生活、对食物、对地质学均有着强烈的欲望。琴塔莫雷将我们带到席尔瓦在古比奥进行研究的岩层露头

处,他声称这些是各处的斯卡尔亚罗萨岩层露头中最好的。的确,古比奥露头是很壮观的,我们采集了遍及石灰岩岩层之上的很多样品,我们希望能看到在斯卡尔亚沉积时代一种日益增大的旋转痕迹,较老的化石罗盘比年轻的化石罗盘偏转得更为远离北方。它应是意大利微板块旋转的古地磁学标记。



图5 比尔·劳里和玛茜娅·劳里在古比奥为古地磁学研究
钻取样品。

这看起来是一个极好的想法,但是,很不幸,当比尔在拉蒙特的实验室中测量了样品的磁性时,我们才认识到我们能够掌握的东西是非常有限的。化石罗盘指向西北,这表示意大利地壳的确已经旋转,但是我们不能得出旋转的详细历史,因为基岩层和石灰岩层是分离的。当亚平宁褶皱使石灰岩层发生 45° 倾斜之时,这就允许岩层彼此作相对的偏转。因此这种残余磁性的错综复杂的样式并不能反映出意大利微板块的

旋转情况；它是由于石灰岩的微不足的局部破裂所造成的。

这对我们是个很大的挫折。收集全部这些样品似乎是浪费我们的时间。然而我们发现的一些事物原来是比测量板块旋转情况更加重要得多。虽然大多数古比奥石灰岩都有化石罗盘，它们一般均指向北，但其中少数的化石罗盘却恰好指向相反方向！地磁倒转是1960年左右被发现的，是拉蒙特实验室的热门研究课题，比尔和我差不多立即认识到，我们正观察到一种新的地球磁场倒转的记录。我们正观察到一种全球现象，该类事物甚至比复杂的地中海构造的局部效应更有趣。

就在10年前发现了地球磁场在过去曾经多次倒转，这对地球物理学家们来说真是令人惊奇的事。地球的行为好像在它的内部有一个巨大的条形磁铁，它大致沿南北向，产生全球磁场，校准船上的罗盘和岩石中的化石罗盘的指向。但是地表下面并没有条形磁铁，因为在地球深处高温状态下铁不能保持磁性。磁场实际上是地球液体铁核内部旋转着的对流运动所产生的，它的运转就像一部磁性发电机。早期的古地磁学家们发现，年轻火山岩中的化石罗盘在有些熔岩流中指向北方，而在另外一些熔岩流中，则指向南方。在长期的讨论和多次测量之后，他们证明地球磁场有从指向北方到指向南方的来回往返的运动，再三反复，原因还不了解。地球的自转和指向是不变的，仅仅是地球磁场的方向发生了倒转。

虽然地磁倒转还是未解之谜，但在比尔和我到古比奥之前几年，它们对验证板块构造理论却起了决定作用。板块构造学说的拥护者们声称，大洋盆地因海底扩张而增大，随着新的洋壳在形成，那里海底的熔岩在淹没的洋中脊顶部冷却；而且大洋盆地被刻印上一种磁性条纹，它是在洋中脊顶部冷却的熔岩获得正常或倒转的地球磁场方向记录时形成的。用在

全球海洋来回航行的轮船和飞机之后拖曳一个磁强计可以绘制成海底的磁性条纹图。最近的几次磁性倒转的年代已用夏威夷熔岩定出,它对应于海底上最新磁性条纹的宽度。它是板块构造学说众多证据中最重要的一个。⁷

在海底的磁性条纹持续不断地向后进入越来越老的洋壳中。但是没有办法测定较古老的地磁倒转的年代,因此也没有办法测定较古老洋壳的年代。为了定出板块运动和大陆漂移的历史,这些年代数据是需要的。对板块构造学说的先驱者们这曾是一个挫折,但比尔和我一看到古比奥的第一批地磁方向倒转的资料,我们就知道测定地磁倒转年代的秘诀正在面前盯着我们看。斯卡尔亚罗萨毕竟是充满有孔虫类化石的。就认定它们在命名的历史时间间隔序列中的地位这个意义来说,有孔虫类化石是测定海中沉积岩年代的最好工具。我们恰好发现了斯卡尔亚也记录了地磁倒转。我们以迂回的、未曾料到的、非常幸运的方式获得了所有年轻科研工作者梦想的突破!

为了取得斯卡尔亚罗萨上上下下相隔很近的样品,为了测定出地磁倒转的详细历史,我们到亚平宁作了一次新的旅行。我们几乎马上发现我们并不是仅有的认识到斯卡尔亚罗萨蕴含着地磁极性历史记录的人。在普林斯顿大学的校友通讯中我看到,我们从前的教授费希尔(Alfred Fischer)带着他的两位现在的研究生:亚瑟(Mike Arthur)和罗根森(Bill Roggen-then)同席尔瓦以及佛罗伦萨的古地磁学家纳波莱奥内(Giovanni Napoleone)一道正在从事同样的研究工作。

起初我们感到深深的失望。在科学上,像这样同时作出的发现可能导致强烈的竞争,它通常是有益的,或者导致经常的恶意争执。为了避免谁是首先作出该发现的争论,我们同费希尔的研究小组合在一起,同意联合努力,共同工作。这是

一次极其成功的合作,1977年我们发表了一组5篇论文,论证了古比奥斯科里亚萨记录的地磁的长、短极性条带序列与在海洋中的地磁条纹看到的序列是相同的。⁸ 地球有两个记录地磁场极性的“磁带记录器”,它们给出相同的地磁倒转的历史,虽然海底的记录器运行速度为深海沉积物的记录器运行速度的6000倍。

其后几年,比尔和我与费希尔的研究小组以及许多其他同事一起边工作边旅行,下自白垩系上至第三系,确定出地磁倒转的序列并用有孔虫化石测定出它们的年代。其他的古地磁学家试图对由“格洛玛·挑战者”号钻探船寻回的深海钻探岩芯中的深海沉积物从事同样的研究,但很显然,由于钻头的振动,使岩芯的深海软泥松散,从而磁性矿物再次改变了磁性的方向。后来,当平稳无振动钻取地层岩芯的技术发展起来



图6 费希尔在古比奥对一群野外旅行的地质学家讲述KT界线的岩层露头。

以后,从对深海岩芯的研究证实了我们的地磁倒转序列。而在 70 年代中期的几年内,能够用来测定地磁倒转年代的只有暴露在陆地上的坚硬深海石灰岩。我们这些曾在亚平宁地区进行过研究的人幸运地得到了机会女神的眷顾,在进行了几次详细研究之后,比尔和我将结果总结在标题为“1 亿年(100 百万年)的地磁极性史”的论文中。⁹

古比奥黏土层的颠覆性暗示

在 70 年代中期,比尔·劳里和我又几次回到古比奥,为确定在斯卡尔亚石灰岩中地磁倒转的位置而收集更多的样品,目的是用席尔瓦的有孔虫化石年代法测定地磁倒转的年代。有时席尔瓦来同我们一起工作,她告诉我们怎样辨认白垩系和第三系之间的界线,多年前她还是一名大学生时已经证认出这一界线。用手持放大镜你可以认出有孔虫近乎灭绝的情况,这些有孔虫很丰富,在白垩系的顶层有孔虫像砂粒一样大小,而在第三系的头几层面上则仅残留最小的有孔虫。

比尔和我学习自己证认 KT 界线,当我们在横贯亚平宁的一个接着一个的岩层露头里找出这一关键界线时,我们开始怀疑它的意义。为什么有孔虫几乎全都灭绝了?发生了什么事引起这种灭绝?为什么灭绝是这样突然?在古比奥,在我们发现的每一新的岩层露头中,在有白垩纪有孔虫的石灰岩顶层和仅仅含有新的第三纪有孔虫的石灰岩底层之间都有一层缺少化石的黏土,厚约 1 厘米。¹⁰这黏土层和灭绝有什么关系呢?

我们邀请费希尔来到拉蒙特实验室作了一次讲演,他强调,在古比奥石灰岩中标志 KT 界线的海中微化石的灭绝至少大致上和所有灭绝中最著名的恐龙的消亡年代相同。我对

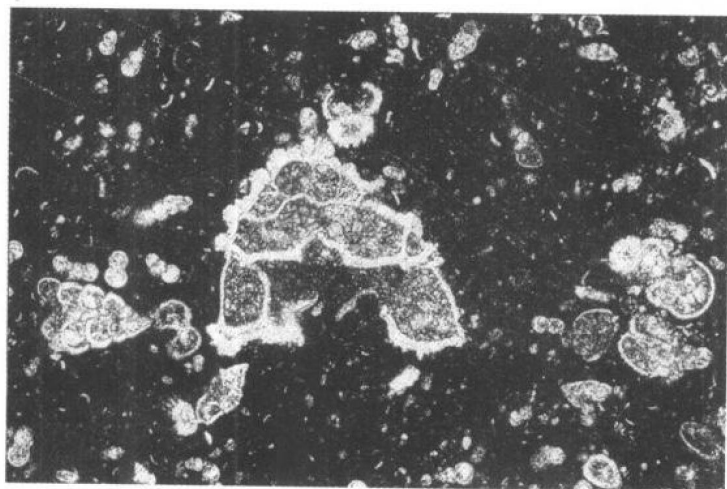
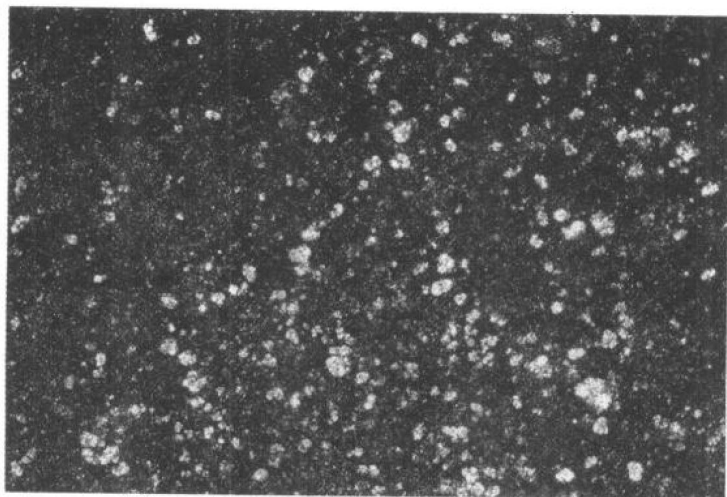


图7 在古比奥的KT界线上浮游有孔虫几近灭绝。下面的显微照片显示,在白垩系顶层中一些大有孔虫的直径大到1毫米。上面的显微照片以同样的比例显示,在第三系第一层面中的有孔虫要小得多。

KT 界线思考得越多,它越加使我迷惑不解。

我记得非常清楚,在费希尔讲演之后不久的一天,我一边在拉蒙特周围空地散步,一边充分认识到这是一个世界级的科学问题。我们作为科学家所做的很多工作,涉及为那些已经基本上理解的事物提供细节,或者把标准的技术应用到新的具体情况。但是偶然也存在一种课题,它能够提供作出真正重大发现的机会。选择什么课题和什么种类的课题去攻关,对一个科学家来说,是一个决定性的战略性决断。KT 边界的生物灭绝问题看来像是一个能够引向完全崭新的研究方向的课题。到我结束散步时,我已决定来尝试解决这个问题。

记录于斯卡尔亚石灰岩中的白垩纪有孔虫的消亡,似乎是突然发生的,或许甚至是灾难性的。但是在 70 年代中期,地球史中的灾变事件的想法是使人困扰的。当我还是学习地质学的一名学生时,我已经获悉灾变论是非科学的。我看到渐变论的观点对地质学家们解释地球历史的记录是多么有用。我曾把它奉为“均变论”的教条,避免提及地球的过去曾有灾变事件发生。

但是自然界显示给我们一些事物似乎是完全不同的,古比奥的小小黏土层的存在是渐变论这个地质学中最有用的、最珍爱的概念所无法解释的。那么,让我们现在来看一看关于地球历史的思考,渐变论为什么会有这样一种坚持己见的把握。

第三章

渐变论者对灾变论者

圣经年代学与灾变说

在前几个世纪中,凡是沿原始的小路翻越阿尔卑斯山的旅行者,都面临着被淹死在波涛汹涌的河流中,或冻死在大风雪中,或被一阵突然而来的石崩所埋葬的危险。就像穿越可怕的障碍物一样,要穿过黑暗峡谷和覆盖着极冷冰雪的荒地、群山,在过去这些必定常被看作是危险的。

当科学家们开始把他们的注意力转移到我们现在所谓的地质学上时,一个显然待解决的问题是,像阿尔卑斯山这样的山脉是怎样形成的。现在我们知道,对这个问题的回答取决于创造它们需要多长时间。如果地球史已经历好长时间,则山脉可以缓慢地和逐渐地形成。然而,早期的地质学家们无意识地假定了一个简短的地球史,由于圣经中实际列举出回溯到地球创生时我们的几代祖先,而且圣经被认为是一种准确的历史叙述,在这个基础上,一位英籍爱尔兰主教厄谢尔(James Ussher, 1581 ~ 1656),确定地球是于公元前 4004 年被创造出来的。

若地球的形成只有这么短的时间,那么像阿尔卑斯山这样的山脉只能看作是来自一次灾变的残余物,也许这种观点产生了有点悲观的反响,使得旅行者在穿越高山关口时明显地会有一种悲哀感觉。只要圣经年代学被承认,那些认为岩石和地理景观是历史的记载的人,必定得出结论,即地球过去

的变化是非常迅速的,这个观点终于被称为灾变说。

直到圣经年代学的束缚被冲破,地质学才成为一门真正的科学。地质学家们把这项突破归功于两位科学英雄,第一位是18世纪的苏格兰人赫顿(James Hutton),他的功劳就在于发现地球是极其古老的。另一个是19世纪的英国人赖尔(Charles Lyell),他被认为是“均变论”之父,他的观点是:在地球史上的一切变化都是渐进的。虽然这些传统的描述在现在看来像是过于简单和令人误入歧途,¹但直到近期它们仍被大多数地质学家以及古生物学家所接受。

给地球绘制地质图

赫顿的古老地球观点和赖尔的均变论,为地质学家们研究他们的中心科学问题——了解岩石和地理景观,提供了必要的工具。人们很熟悉的山脉如阿尔卑斯山脉以及如大峡谷那样的令人注目的近期才发现的地理景观,不再需要用灾变说来解释了。在很长的时间里,慢慢的形变和慢慢的侵蚀可以更好地解释地质学家们在野外所看到的现象。约翰·缪尔(John Muir)正确而又富有诗意地把美国约塞米蒂国家公园竖墙般的巨大岩壁之成因归结于由冰河的慢慢碾磨而成,而不是由激变和灾变形成,他说:“大自然并不选择地震或闪电这样激烈的手段,也不采用暴风雨式的急流或雨的侵蚀,而是让柔软的雪花静悄悄地下落了无数世纪去撕碎和分裂太阳与海洋的后代。”²

古老地球的概念,使得有可能正确地去理解岩石和地理景观,但它也提出了一个新的问题。在贯穿整个地球历史的46亿年中,活跃的地质学过程已经把地球造就成一个巨大的综合体并产生了各式各样的一大批岩石。这些含有地球历史

记录的岩石,在全球各个地方——例如在农场里,在沙漠,在山上,在密林里以及在海底都能找到它们。要描述所有这些岩石,并且解释地球的全部历史,将是一项很难完成的任务。它需要好几代的地质工作者们去奋斗才能完成。因此,在19世纪初,地质学家们定下心来去执行一项显然是必要的任务——去测量并描述整个地球表面的岩石并把它们的分布标绘在详细的地图上,这将是了解地球历史的基础。

对地面上一个区域,绘出准确的地质学地图,并标出所有不同种类岩石的位置以及它们的几何关系,是一项富有挑战性而有益的任务,它使地质学家们在绘图方面变成非常熟练的能手。我曾经描绘了几张不同比例尺的地质学地图,我为有这些地图而感到骄傲和高兴。

经过几十年,系统的地质学地图为地球上逐个区域的历史提供了越来越详细的知识,测绘地质学地图引导出许多惊人的发现,像地质工作者对阿尔卑斯山的认识,即厚岩石层沿着所谓冲断层的裂缝被上推到新岩石之上好几千米高处。³地质学地图还会有巨大的经济效益,因为它会引导出巨大的石油储藏量和矿物储藏量的发现。可以毫不夸张地说,20世纪的技术和工业文明是建立在由地质学地图所发现的大量自然资源的基础上的。

需要是实际的,任务是艰巨的。但当人们世代持续进行着绘制地质图的工作时,有很多人都忘记了原先的目的是要全面地了解行星地球,而把绘图本身当成了目的。广大地质工作者的愿望是要找到一个新的、没有接触过的地区,在那里以前没有人绘制过地质图。由于新的地区变得越来越少,地质学家们就更细密地考察那些已经熟悉了的岩石。

地质学绘图是令人满意的而且是很有用的,但是回想起来,其中大部分在我看来似乎是相当常规的脑力工作。在20

世纪初叶,物理学家在解读“上帝的意向”(用爱因斯坦的惯用说法)——探索宇宙尺度上时空的曲率和发现无限小的奇怪的量子特性,而地质学家们则努力重建古老河流的路线以及过去不同时期的陆地和海洋的图样。相对论与量子力学几乎让物理学家的智力扩展到了极限点,迫使他们进入以前从未有人涉及过的思维领域,而且从根本上改变了我们的整个宇宙观念。地质学仅仅要求它的弟子学习地质学绘图技术,并熟记大量复杂的术语,然后派遣他们外出,去获得有关记录有地球经历的岩石的新知识。

然而,事后证明地质学家是聪明的,我们看到这种绘图是一种投资,它现在正付出巨大的利息。物理学可以把复杂问题简化为更简单的成分,从而很快地作出重大发现,因为物理学研究的是大自然的基本规律,它不会改变,且不会随时间变得更加复杂。地质学是要探索地球,地球已经历 46 亿年的演化过程,在它的岩石记载中,积累了越来越多的复杂的历史事物。一个半世纪以来,测绘地球得到岩石所记载的详细信息,这使得地质学在现在成为一门成熟的科学,擅长于解释复杂的历史事物,因此,也许这门学科会成为引导科学走向 21 世纪的神圣世界的最好铺路石。

冒险的诱惑

当我到达普林斯顿时,我的一些研究生同伴正在绘制整个加勒比海附近的岩石图,这是赫斯(Harry Hess)教授研究计划的一部分,而我则被他们的野外冒险故事所吸引。穆雷斯(Eldridge Moores),他后来在板块构造革命中作出重要发现并成为美国地质学会主席,曾讲述过关于努力驾车带赫斯教授越过海地岛上多山的南半岛的苦难经验。在半夜倾盆大雨期

间,他们的吉普车在寄生虫蔓延的河流中发动机发生故障,而在河畔的村庄上,伏都教徒们环绕着火正在敲着不吉祥的鼓。洛克伍德(Jack Lockwood)曾耗尽毕生精力去帮助人们逃避世界各地活火山的危险,现在他刚从南美北端的瓜希拉半岛上完成他的第一次野外季节测绘回来,并讲述了有关与遥远沙漠荒野上印第安人共同生活的丰富故事情节。这正是我所向往的。

赫斯教授接受我参加他的加勒比海计划,而野外地质学提供了我所希望参与的一切冒险。在瓜希拉半岛的两个季度测绘工作之后,一次幸运的介绍会面,导致了同一位年轻的心理学女研究生闪电般的恋爱,她名叫米莉,像我一样很喜欢旅游和探险。在瓜希拉半岛中没有路的沙漠上,我们度过了一个很长的蜜月,其间我在这个世界的特殊地区绘制了一张详细的地质图。我们睡在罗伯蒂科巴罗索的贸易站的后房里,有时则不管野外测绘工作把我们带到什么地方,我们就睡在营火旁边的吊床上。我们讲西班牙语并从我们的野外伙伴雷斯特雷波(Lucho Restrepo)那里学到一点瓜希拉语,弹吉他,唱哥伦比亚歌及委内瑞拉歌曲,并去了解那些很快就要消失的生活方式。我们学习了有关管理此半岛的传统印第安法律,学习瓜希拉部族的象征符号,以及学习了有关古代的世仇之争和毒箭的使用。我们驾驶我们的轻便型越野汽车越过沙地并沿着岩石重叠的干河道前行,把来自风车多少还可饮用的水灌满我们的桶,整夜与印第安人及走私者谈天和唱歌,喝几瓶温啤酒,且每个月去一趟镇里补充供应品。这样,也许我的博士学位论文在学术上不会是非常优秀的,但是它在世界地质测绘上填补了另一个空白,而且它是一次不能遗忘的冒险。

现在是了解过去的钥匙

作为学地质学的学生,学习野外测绘技能时,我们把注意力集中在传统的、孤芳自赏的关于缓慢的、渐进的地质过程上。我们的学科已对科学大厦作出一项重要贡献,我们为此而感到骄傲。这个贡献不是对地球古老的发现,也不是对地球演化理论的发现,而是发现了均变原理。

表达均变说的一种方式,是用“现在是了解过去的钥匙”这一成语。这种简洁阐述是有点含糊,但它在许多情况下都是很有用的。它意味着如果您想了解古代港湾的沉积情况——泥岩层、波浪形的沙石、掘开河床的潜穴等——您就应该走出去,研究像旧金山湾这样的现代港湾,涉过潮泥滩,测量潮水流过的沙地上的波纹,找出哪一种类型的蛤在掘穴等。⁴这种均变原理的简洁阐述,适用于一个宁静的、渐变中的地球,因为地质学家们唯一能够直接观测——且能活着讲述这故事——的过程是平稳的、宁静的过程。地质学家们遵循均变说的训诫,即相信现在是了解过去的钥匙,因而在解释古代各种类型的沉积问题上取得了很大的进步。它是一个极好的研究策略并导致许多发现。

但是均变说还有第二种意义。接受“现在是了解过去的钥匙”的观点,且注意到在近代人类历史上实际上没有发生过较大的灾变——没有比大地震或火山爆发更厉害的灾变——地质学家们认为一个多世纪以来,在地球历史上灾变没有起到重要作用。⁵

自然界没有激变的征兆

观测意义上的演化——即随着我们的研究从较老的沉积

岩转到较新的沉积岩,化石也随之有变化——这对于早在1800年左右的古生物学家史密斯是一个不可避免的结论。早期的古生物学家注意到,在地层记录中的某些层次上发现所存在的化石种类有突然的、引人注目的变化。他们发现这些突变,在距离很远的范围内都是可被辨认出来并且可当作分界线,把地球历史划分为几个已被命名的阶段。在这些化石记录中最近的巨大突变性被用来确定白垩纪与第三纪之间的界线。

作为赖尔的均变历史观的一部分,他认为由化石所记录的生物学上的变化率总是保持一样的,于是白垩纪末的化石与第三纪初的化石之间几乎完全不同这个事实,对赖尔来说出现左右为难。他被迫作出结论,已经逝去的漫长时间是无记录的,——即没有沉积物沉积在迄今已发现的任何地方,在这漫长的岁月里,通常表现为以慢速率变化的化石必然要有这种巨大的差异。他主张,在白垩纪和第三纪界线上已逝去、无记录的时间,比从那时起已逝去的全部时间还要长。⁶ 这个惊人的结论是他相信均变速率的必然结果。在KT界线带有黏土薄层的古比奥石灰岩直到赖尔死后很久才被研究。按他的历史观应要求黏土层呈现时间比它上面几百米高的所有第三纪岩石还要长。我不知道赖尔对古比奥岩层露头会有什么想法……

直到19世纪中叶为止,没有人能了解化石所记录的进化变迁的道理。到1858年有了突破,这时华莱士和达尔文独立地且几乎同时地提出,进化是通过对有利特征的自然选择而发生的。这种解释在很大程度上持续应用到今天,用成语概括地说就是“适者生存”。虽然华莱士首先写出他的论文,但达尔文提供了可信的详细证据,首当其冲受到狂暴攻击,且因此理论而名声大振。

在进化论的系统阐述上,达尔文和赖尔之间的相互影响令人感兴趣。1831~1836年,达尔文在“贝格尔”号舰上的长时间环绕世界航行中,受到赖尔《地质学原理》的强烈影响,当时他在作许多观测,而这些在后来导致他的理论形成。⁷ 达尔文在写他自己的经典专著《物种起源》时,将赖尔的渐变说作为进化理论的基本原则。受责难的渐变说,在达尔文使其成为理论之后,立即为赫胥黎(T. H. Huxley)所赏识,赫胥黎这位积极支持者终于得到“达尔文的斗犬”称呼。他给达尔文的信中写道:“在采纳自然界没有激变征兆中,你如此坦然地给自己承担上一种不必要的困难”。⁸ 自然界没有激变征兆意味着自然界不会发生突然的跃变,然而这个思想仍然保留为达尔文理论的一个中心原则,并且直到现在仍强烈影响着古生物学的思想。似乎对大多数地球科学家来说,自然界是平静的、井井有条的领域,在其中突变和不规则变化都是被禁止的。

对均变论的正面一击——斯波坎的洪水

然而在一次值得纪念的事件中,渐变论者的正统说法受到不同意见的威胁。这个挑战出现在20世纪20年代,当时芝加哥大学的勃雷茨(J. Harlen Bretz)记述一个在华盛顿州东部的斯波坎附近名副其实地名为“不毛之地”的巨大干河道网。这些干河道看起来像河谷,带有波纹形的沙滩,但具有庞大的规模。勃雷茨认为它们曾在冰河时期被一次巨大的灾难性洪水冲刷过。一次灾难性的洪水!必定像是又回到圣经中的灾变论。均变学说的重要势力全都反对勃雷茨,因为那些从未到过华盛顿州的地质学家们反对他的解释,他们确信任何类型的灾变论都是不科学的胡说。⁹

公道地说,勃雷茨没能够说出这种突然的洪水是从哪里

来的,所以的确有理由怀疑。但是帕迪(Joseph Thomas Pardee)认识到,美国蒙大拿州的米苏拉山腰高度上的海岸线走向是从不毛之地溯流而上的,并且正确地把它解释为一个大湖的界岸线,此湖曾经充满一个深谷,临时被冰河的冰所阻塞。¹⁰到20世纪40年代根据帕迪的研究,弄清楚了米苏拉冰川湖的冰坝在冰河融化时破碎了,释放出巨大的洪水,灾难似地侵蚀不毛之地的河道。

然而,在探测火星的空间探测器图象上发现了类似的不毛之地以前,均变论拒绝接受斯波坎洪水的说法有20多年之久。最后,在1965年,由一个国际地质学家小组对这一领域的证据的新调查,把问题弄清楚了,原来勃雷茨观点始终是正确的。在他83岁那年,他从那些曾对这问题带有错误认识的人那里收到一份贺电,上面写道“我们现在都是灾变学家了”。¹¹

虽然均变论受到从正面的这种偶然一击,直到20世纪中叶,大多数地质学家仍然都主张均变论,但几乎没有地质学家已真正理解了赖尔。我们只知道他是地质学的缔造者,我们的科学所建立的格言便是没有什么事物有真正的戏剧性变化——在行星地球的过去不曾有灾变发生。这是我和米莉于60年代中叶在瓜希拉半岛野营时以及我在绘制一名见习地质学家所需要的地质图时的思想倾向。

“双子座”、“阿波罗”及空间探测器

我记起1965年8月的几天,正当瓜希拉半岛遇上严峻的干旱,这些天在时间上几乎都是超现实主义的,且回忆起来似乎都是不可思议的象征。那是在塔帕拉辛的贸易站举行一年一度的宗教节日期间,来自各个地方的人民,随着音乐和舞蹈

消费掉大量的烤山羊和烤绵羊以及家酿的名叫“奇林奇”的白色劣等威士忌酒。教区的神父也从几百千米外的地方赶来，给新生儿施行洗礼并求雨。第二天下了一点雨，每个人都很高兴——特别是神父。第二天晚上我和米莉参加塔帕拉辛附近的葬礼，并观看瓜希拉的哀悼场面，那里有更多的烤山羊、烤绵羊和更多的“奇林奇”，人们在星光下围绕着新的棺材哭。当这些不定时间的活动在开展时，我们偶尔调到收音机的短波，收听来自“双子座”5号宇宙飞船的信息，这时库珀(Gordon Cooper)及康拉德(Charles Conrad)飞越过头顶的夜空，反复地绕着地球转，按美国国家宇航局计划要准备飞向月球。

这是个尖锐的对比，它似乎是人类历史上一个巨大飞跃的象征，很快瓜希拉的生活方式，像到处看到的那么多传统方式都将消失。干旱继续着，于是许多印第安人迁到马拉开波市。然后开采一个大煤矿和铺设铁路，把煤运到建立在瓜希拉海岸的一个港口。

虽然这项工作花了好多年时间才完成，那尖锐的对比也是地质学上变化的象征。我的科学就要从头到脚地被动摇了。空间计划继续按进程运行，在1968年的圣诞节前夜，“阿波罗”8号携带着博尔曼(Frank Borman)，洛弗尔(Jim Lovell)及安德斯(Bill Anders)环绕月球旋转，人类第一次摆脱了地球引力的束缚。在对地球的无线电广播中，他们描述了从飞船向下看到的月球凄凉荒野景色和向后看到的地球蓝色、绿色沃洲景色之间的生动对比。他们诵读创世纪的第一节——一份圣诞礼物送给厌烦国内不稳和越南战争的国家。“当初上帝创造了天空和地球……而且上帝看到它是好的。”

“阿波罗”8号的宇航员往下看到月球上有无数的环形山，几乎到处皆是，而且月球表面的某些部分已经完全挤满了环形山。几个月后当其他宇航员竟然在月球上行走时，他们

收集到月球土壤样品、全部充满破碎的岩石碎片,它们带有因撞击而融化的玻璃球粒,还有使这些球变得坑坑洼洼的微小撞击坑。根据这些样品的研究,已经弄得非常清楚,原来覆盖在月球上的这些环形山都是由于小行星和彗星撞击而成的——由均变观点统治着的地质学思想不允许这种类型的灾变事件发生。不久,无人探测器发射到其他行星及卫星上,从发回的图象弄清楚了,由撞击而形成环形山这在太阳系中是个惯例,无一例外。几年后,地质学从研究单一行星的学科发展为一门被来自许多行星和卫星(它们多得不易全部记住)的数据所充斥的学科。这些天体中的大部分都被由撞击而形成的环形山所覆盖。

尤金·苏梅克(Eugene Shoemaker)是月球地质探查与太阳系大多数天体非载人研究方面的首席科学家。几乎在任何一位别的地质学家对月球感兴趣之前,尤金就曾被美国地质调查局派遣到科罗拉多高原上作野外测绘,并在这高原上他曾用自己的测量望远镜在夜间晴朗天空研究过月球。他证实了“陨星坑”*的撞击起因,他在弗拉格斯塔夫建立了地质调查局的天文地质学分部,只是最后一分钟因健康问题使得他没能成为在月球上行走的第一位地质学家。尤金·苏梅克超越其他人,是撞击地质学之父。

地质学上发现整个太阳系内岩石型行星及卫星都被撞击坑所覆盖,尤金可能曾经期望在此发现所产生的刺激下,均变论、渐变论思想会被扫清。地质学本来应该从研究单一行星的科学转变为研究很多天体的科学,这些天体几乎全被灾难性撞击的迹象所覆盖。但一个显然的讽刺是这种转变却不曾发生,相反,均变论仍然是强者。大量行星和卫星被绝大多数

* 指美国亚利桑那州的大陨星坑。——译者

地质学家大大忽视了,因为行星与卫星空间探测的革命性发现被甚至更激动人心的进展即板块构造革命所压倒,而后者是完全均变的。¹²

板块构造均变论的胜利

直到 20 世纪 50 年代,大多数地质学家深信大陆总是处于现在所在位置。垂直隆起和下沉始终是不可否认的,因为有古代海平面为证据,古代海平面由像珊瑚礁和海滨沙粒那样的海边沉积物的沉积作用留下了参考标志。这些古代海平面的标志现在可能在高山上找到或埋藏在地下深处,所以垂直运动的观点已被人们所接受,并且是地质学家们试图去阐明的地球历史的中心问题。

但是较大的水平运动的可能性已被断然否定,因为地质学家们很少能找到迹象来证明古代存在水平运动。公认观点认为大陆位置总是固定不变的,向此观点挑战的是德国气象学家魏格纳(Alfred Wegener),他在 20 世纪 20 年代证明南美洲与非洲的相匹配的海岸线确实提供了水平运动的迹象。他认为这两个大陆必定曾经是边靠边地拼合在一起,随后它们通过大陆漂移而分离开。¹³魏格纳把现在的这些大陆重新聚合为一个巨大的大陆,叫做“泛大陆”,意思是“所有的陆地”。在他重新创建的泛大陆中,不仅要求每块大陆的形状要彼此吻合,而且任何数目的地质学特征——例如古代冰川沉积物——也要彼此吻合,就像在益智拼图板上拼合图案一样。但是大多数地质学家不是不理睬魏格纳就是嘲笑他以及他的大陆漂移。不理睬他的最正当的理由是魏格纳提出的大陆驱动机制必定是错误的——他想像漂移着的大陆要穿过深厚的固体地球艰难地向前运动,就像船穿越大海一样,地质学家们

当然拒不相信这在实际上会是可能的。

于是在 60 年代末,当板块构造革命猛击地质科学之前,大多数地质学家都相信大陆位置是不变的。¹⁴然而在标出磁性倒转的海洋地壳的新地图中,确实显示出某些海洋正在逐渐加宽,而新海洋地壳在洋中脊生成,那里深处的地幔岩石上升并冷却。地震定位的准确新测定表明,当老的海洋地壳降回到由火山带附近深海沟所标志的地下深处时,其他海洋就在收缩中。地球物理学家认为地球表面被划分为若干个板块,每一个板块相对于所有其他板块而运动,并携带大陆随之运动。甚至有可能计算出过去板块的运动。¹⁵除了大陆并没有穿越深厚的固体地球艰难地向前运动之外,魏格纳关于大陆漂移的看法是正确的;当地球深处产生对流时,大陆被携带着一起运动——因为对流的缓慢翻转就像用文火慢煨一壶浓汤(液面顶上有一浮动层),缓慢地沸腾一样,允许它内部的热能向外逃逸。

板块构造的发现,给地球科学充了电。很快,工作在一个大陆上的地质学家们有理由对另外一些大陆感兴趣,因为离开很远的一些大陆可能以前还是邻接在一起的。海洋的深处彻底地被探索。采用扩张中或收缩中的海洋以及在碰撞中的大陆的观点来重新解释大陆边缘的沉积物和山脉的变形岩石。地质学从一个相当常规的科学领域转眼间变成了也许是 20 世纪 70 年代最有生气的科学。一个多世纪的详细测绘所获得的地球的知识终于得到回报,因为当这些测绘被完成时,这些知识指导对一个从未想像过的理论作系统而确切的陈述。

专心致力于板块构造革命的极少数地质学家们常常忘记了所有这些新发现的快乐。差不多所有地质学家们都以某种方式介入其中,因为板块构造几乎影响到地质学的各个方面。

板块过程已经连续作用了至少 10 亿年,而它们的影响已经以种种方式铭刻在地球上的几乎每块岩石上。到处都有研究的机会,且十多年来有许多新发现涌出,完全吸引了各处地质学家们的兴趣。

数百位地质学家们走出到野外并用板块构造的新眼光来观察各种岩石,回来后对地球的新了解作出贡献。同时,一个奇妙的讽刺,在月球着陆——第一次在另一世界的地质勘探——却被大大地忽视了。唯一的一位地质学家施密特(Jack Schmitt)和几位受过地质学训练的宇航员在月球行走。月球样品以及行星空间探测器拍摄的行星图象由少数科学家作了研究,他们认为整个太阳系里彗星和小行星撞击的证据是无可非议的。

灾难性的撞击是事实,而否定撞击事实的严格意义的渐变说被废弃或本应被废弃。但是大多数地质学家们并不关心这一点。我们甚至被更激动人心的板块构造的发现所吸引,而且板块构造的核心概念还是逐渐变化。海洋是如此之宽阔,乘喷气飞机也要花上几个小时才能跨越它,由于海底扩张,海洋以每年几厘米的速率——相当于你的指甲生长的速率——扩展了已经有几千万年了。板块构造是可以想像得到的最为渐进的均变理论。月球和行星上灾难性的撞击迹象几乎没有引起一个被板块构造上重要成就所吸引的地质学团体的注意,而且所有陈旧的均变论偏见还由于板块构造革命的胜利得到加强。因撞击坑遍布于整个太阳系这一事实而废弃严格意义的均变论的要求不得不等待下去。

恐龙灭绝的均变观点

在 20 世纪 70 年代中期,板块构造理论指导了许多地质

学上的研究。正如上一章所叙述的,当我和比尔·劳里去意大利亚平宁山脉时,我们的想法是去收集古地磁数据,以检验板块构造概念——去检验意大利半岛是否具有一种微型旋转板块的特性。我们的计划没能实行,但是我们却发现,我们能够确定磁性倒转的化石年龄,而这是测定海底扩张和板块运动时间的关键。但是当我们在古比奥渐渐熟悉 KT 界线并学会自己找到它时,我开始思索关于与板块构造完全无关的问题:为什么在 KT 界线处有大量生物灭绝?为什么有孔虫类几乎完全死亡?为什么恐龙消失?

我在大学或研究生院时并没有学习很多有关恐龙死亡的知识,生物大量灭绝未被看作为一个问题,过去几乎没有注意到它。1886 年,美国密歇根大学地质学与古生物学教授温切尔(Alexander Winchell)采用通俗剧似的散文来逃避这个问题:“一种高级类型的生物现正站在生命的门槛上。一声丧钟正在为爬行动物王朝的葬礼敲响。在高级生物逼近之前,蜥蜴类动物成群衰退。在辉煌统治过后,爬行动物王朝颓然倾倒在地,而我们只能从记载它的毁灭的历史中得以知道。”¹⁶差不多 50 年后,主要教科书中的叙述几乎都是含糊的:“不管什么原因,最近的中生代是一个苦难的时期,这期间很多主要生物处于‘遭受忐忑不安的折磨和寻找希望’——希望适应新环境的状态。”¹⁷

到 20 世纪 70 年代中期,叙述得稍微详细些,它们反映了流行的有关地球历史的均变观点,把恐龙灭绝归因于气候变迁或海平面下降。不管这种机制是怎样,都把灭绝看作是渐进的,至少经历了几百万年,因此实际上不是一个非常重要的问题。每一物种最终都要灭绝。古生物学家说,灭绝是一个连续过程,恐龙种类全部都要灭绝,一个接着一个,到白垩纪末,不留下后裔。从一般观点看,恐龙是伴随着呜咽声而不是

伴随着轰然巨响走向灭绝的。的确,以这样方式看,恐龙的骨头是很稀少的,地层学的记载是非常不完整的,只保存很少的化石,一次突然灭绝似乎是以渐进的方式出现的。¹⁸最著名的恐龙,霸王龙,是从仅有的几块化石样品中知道的。显然还不能提供足够信息从渐进灭绝中区别出一次突然灭绝来。

罗素(Dale Russell)是一位卓越的恐龙古生物学家,他从伯克利获得哲学博士学位,在渥太华的加拿大国家自然科学博物馆工作,他仔细考察了恐龙灭绝的地层学记载。他确信需要一种突然灭绝机制。罗素不能想像靠一次地球事件能突然杀灭所有的恐龙,所以他猜想是一次地外原因。根据以前的联想即来自附近的超新星——一种爆发星——的辐射能杀灭地球上的生物体,¹⁹罗素和物理学家塔克(Wallace Tucker)在1971年提出假说,即由于一颗超新星爆发引起的气候变迁,导致恐龙的灭绝。²⁰

这是一种灾变假说,与地质学家和古生物学家的全部实践和经验相矛盾。罗素的同事们暗中窃笑和不理睬他。然而,由地外原因引起突然灭绝的罗素观点,可以检验的时刻来到了,很快将有一次科学研究的洪流,它将涤荡尽严格意义上的均变地质学说。

第四章

铍 元 素

地质学与物理学

在回答有关地球的问题方面,均变论的渐进主义提供了一个极好的理论框架。地质学家们从他们的老师那儿学到了均变论,发现在实践中它对地质特点的解释几乎一直是可信的。除了像华盛顿州东部的不毛之地似乎需要用灾变起因作解释或者被忽视外,渐进主义已经变成了一种教条。

我一度认为,古比奥的KT界线处的薄黏土层不仅引发了是什么原因造成了大规模生物灭绝的问题,而且似乎还同地质学家们的渐进主义思想倾向产生了抵触。古比奥有孔虫的近乎灭绝的情况看来十分突然。费希尔在拉蒙特所作的报告中,曾经强调说恐龙的灭绝发生在同一时间。霸王龙是在一次大灾变事件中灭亡的吗?

在我看来,古比奥的黏土层似乎能回答问题。但看起来像相当平常的黏土,我根据什么用手持放大镜和一架显微镜就能看出原因呢?斯卡尔亚石灰岩的大部分岩层都被薄黏土隔层分隔开来,虽然KT层稍微厚一些,似乎却并没有什么特别不一般之处。KT黏土引起关注的唯一理由是其上方与下方岩层中的有孔虫完全不同。

如果说古比奥KT黏土层中存在什么线索的话,或许是某些事物超出了地质学家们的平常经验之外。我开始同我父亲谈起有关生物灭绝的问题。我的父亲,路易斯·W·

阿尔瓦雷斯，是加利福尼亚大学伯克利分校的物理学教授。他是一位实验物理学大师，是劳伦斯·伯克利实验室一个研究组的领导人，该实验室曾发现过一大群亚原子粒子，因而获得了1968年度的诺贝尔奖。父亲一直具有广泛的好奇心和能力，能对有趣的课题凭空想出新奇的探索办法，例如在一次研究探索中，他和他的朋友埃及考古学家法赫里(Ahmed Fakhri)，采用宇宙射线 μ 介子透视位于吉萨的凯弗伦(Kephren)金字塔。¹他们本打算找到许多未曾开启的存满宝藏的窖室，却发现这座金字塔从底到顶全由坚实的岩石所构成。

父亲原来并不认为地质学是一门有意思的学科。这还得归功于我的母亲杰拉尔丁(Geraldine)，是她引导我爱上了岩石。我在上中学时，母亲带我和我妹妹琼(Jean)乘火车旅行，横穿西部观看壮丽景色，还指引我到伯克利丘陵各处搜集矿石。她总是喜欢提起我的第一把凿岩锤是从她那儿借来的，后来丢了。

我离家去学院和研究生院，后来生活在荷兰、利比亚和意大利。很少见到父亲，对于身为科学家的父亲的活动知道甚少。当茉莉和我1971年从意大利回来，我开始在拉蒙特成为一名研究人员后，父亲来看我们。他对在拉蒙特看到的全部地质学的和地球物理学的资料着了迷，在正达到颠峰的板块构造学说革命的激励下，我们想到要是尽力把他的物理学与我的地质学结合起来，将会大有意义。我们在电话上谈论过许多次，对测定岩石年代问题提出一些有创新意义的技术。我们觉得所提出的观念是新的，但不幸其他人以前已经发明了这些技术，还明白了其不能运作的原因。然而，这些活动却激发了我们共同工作的兴趣。

利用铍元素测定赖尔间隙

到了1976年,我的注意力集中在KT界线生物灭绝问题上,并开始同父亲讨论这一课题。对古比奥黏土层我们能提出什么具体问题呢?我们能对它做出什么有意义的测量呢?

我指出弄清楚沉积这层黏土费去了多长时间是会有价值的。黏土快速沉积将表明灭绝会有突然起因,而缓慢沉积将支持渐变机制。这是新包装下的那个赖尔的老问题,尽管当时尚不清楚。正像在第三章中讨论过的,赖尔于1830年就注意到,白垩纪地层顶部与第三纪地层底部的化石差异要比第三纪地层底部的化石与现在活着的动物之间的差异还要大。在他的渐进论观念的引导下,迫使他只能认为,在白垩纪地层与第三纪地层的界线处存在一个比整个第三纪逝去时期还要长的未曾揭示的地层学间隙。直到1976年,才看出这显然是错误的。用放射性年代测定的方法(尽管用得不多),可把KT界线很粗略地确定在6500万年前,并认定有一个只不过是几百万年的时间间隙存在,在一段短时间内出现巨大的动物区系变化,意味着那时曾有过大规模生物灭绝,因此赖尔的极端渐进观是错误的。

古生物学家们对此也很了解,但他们提出有几百万年的充裕时间,可把KT大规模灭绝解释为是在这段时间内逐渐发生的。然而,比尔·劳里和我,同费希尔的研究组一起早已指明,古比奥的斯卡尔亚石灰岩记录着从海洋盆地磁性条纹所得知的全部地磁极性带。包含KT界线的倒转的极性带似乎代表着大约50万年,呈现出在预期的厚度范围内;所以显然这个KT间隙代表短于50万年,很可能仅仅是10万年。

在地质学时间尺度上,这种大规模灭绝曾是突然发生的。

但在人类时间尺度上它曾是突然发生的吗？我们需要测定出KT黏土的沉积速率——是一年或不到一年，还是经过数千年的沉积？父亲想出来一个找出这一沉积速率的办法。他建议我们测出KT黏土中同位素铍10的丰度，这种同位素具有4个质子和6个中子。铍10是半衰期较短的放射性同位素。在大气层中，铍10继续不断地产生着，这是由于当高能宇宙射线（来自遥远星系的快速飞行的原子核）猛烈轰击空气中的氧和氮时，把它们击成了更小的碎粒，其中就包含着铍10原子核。这些新产生的原子可能混入像古比奥的KT黏土这种沉积物之中，黏土代表的时间越长，它就包含着越多的铍10。公布的铍10的半衰期为250万年，看来恰到好处——对于比KT界线早的原子来说，快得足以使它们消失并且不使物质混乱，而至少对于有些与黏土同一时期的原子来说，慢得足以使它们保留下来。如果能测出铍10的含量，假定6500万年前的产生速率与当今相同，且从那时起放射性衰变就是正确的，那么，就能算出黏土代表多长时间。

父亲知道谁能做铍10测定。他让我与马勒（Richard Muller）打交道，马勒是在我的父亲指导下获物理学博士学位后在伯克利工作的年轻物理学家，在岩石年代测定和其他古老材料的时间测定上，他刚发明了一项新技术。马勒相信，回旋加速器（把原子核粒子加速到很高的速度用以击碎原子的设备）能用作超灵敏质谱仪，与以往用过的仪器相比，对确定某种元素的不同同位素丰度要更加优越得多。利用加速器质谱仪作年代测定自那时起已被广泛采用，马勒在这方面的的工作以及另几项科研项目的获奖使得这些新技术就要被认可，他所获奖励有麦克阿瑟奖、得克萨斯仪器公司奖与国家科学基金会的沃特曼奖。

马勒有个到纽约的旅行计划，1976年12月他到拉蒙特来

访问我。他为拉蒙特的科学家们作了一个有关用加速器作年代测定的可行性报告。我带他参观了装满来自世界各地的大洋底层沉积物岩芯的仓库,我们沿着帕利塞兹山的峭壁漫步,俯视哈得孙河,谈论到如何把物理学用到解决地质问题之上。这便是我们之间持久友谊的开始。²

马勒返回伯克利,我们通过电话交谈,同时不断交换着满满写着计算材料的信件,我们准备着 KT 界线黏土中铍 10 同位素的测定计划。每件事都在按部就班进行着,直到得知令我们失望的消息——说公布的半衰期是错误的。铍 10 的半衰期仅为 150 万年,实际上比我们曾设想的快多了。6 500 万年后的今天,由于铍 10 遗留得太少会使得测定铍 10 丰度毫无希望,计划打消了。科学探索的每一项成功都有许多失望相伴。

伯 克 利

从我取得哲学博士学位到当时已有 10 年。米莉和我曾生活在南美、荷兰、利比亚、意大利和纽约。博士后研究员的生活虽然令人激动,但并不安定,我们开始考虑能过稳定的职业生活。到了 1977 年,伯克利的地质学及地球物理学系空出一个教学职位。我提出了申请,受到伯克利教授们的口头审查,作了一个我一生最重要的报告,于是被邀加入了该系的教授行列。如此幸运对我是个巨大激励,甚至今天我还不相信竟发生了这样的好事。

同马勒一起最近的失意,反而增加了我解决 KT 灭绝之谜的决心。我于 1977 年秋天,一到了伯克利,就开始花费时间同父亲及马勒一道,尽量弄懂更多的物理学,还帮助他们对地质学产生更多的兴趣。父亲已为一项新计划作好准备。他

探索金字塔中埋藏着法老的财宝的迷梦已经破灭,当时猎取新亚原子粒子的活动也已减慢。父亲很少休息,他总是准备着发掘新的奥秘。

我来到伯克利不久,就给了父亲一份从古比奥的 KT 界线地层取来的精致样品,他被迷住了。在加勒与我工作过的问题上我们决定另辟蹊径:在古比奥的标志着灭绝层次的黏土层代表了多长的时间?灭绝究竟来得有多么突然?

为了便于检验,一个科学问题应当作出清楚的系统表述,这儿就是能让我们据以系统表述的一些信息根据:斯卡尔亚罗萨石灰岩沉积在一处相当深的海底,90%~95%由碳酸钙构成。这种碳酸钙部分来源于有孔虫,而其余来自更细小的颗石藻,或来自隐藏在海洋漂浮的藻类中唯有高倍率显微镜才能看见的小片状体。斯卡尔亚(沉积物)另外的5%~10%由细黏土颗粒组成,它们最初是由河流携带或风吹而传递到海洋里,然后同有孔虫和颗石藻一道沉积到海底。而 KT 界线处厚度为1厘米的地层却不同于此——它主要由黏土构成,其中不存在原始碳酸钙,因而没有能提供大规模生物灭绝时期详细记录生命史的有孔虫和颗石藻化石。

在系统表述黏土层代表多长时间这个问题中,我们看出有两个可能性。第一种可能过程是,在灭绝期间黏土沉积速率一直保持不变,而石灰岩的沉积已停止——或许由于生物灭绝曾遗留极少量有孔虫或颗石藻而产生碳酸钙。在这种情况下,黏土层的沉积会用去几千年时间。

在第二种可能的过程中,碳酸钙的沉积一直延续未曾停顿,也许是由于更活跃的河流浸蚀或强烈的暴风雨,还曾有过向海洋供应黏土的短时期突然增强的现象。在这种情况下,则黏土层有可能只代表几年的时间。到底是石灰岩的沉积速率恒定不变还是黏土的沉积速率恒定不变呢?

现把这个问题准确、简洁地陈述为：这一黏土层代表着几年还是几千年时间？还可以用能告诉我们一些与生物灭绝有关的事物的方式简洁地陈述为：是几千年中产生石灰岩的有机体出了问题，还是有若干年异常快速的黏土沉积？

铍 元 素

我们如何做才能取得问题的答案呢？我们需要找到在斯卡尔亚石灰岩中沉积的某种物质，它在黏土层中必须是以恒定速率沉积下来的，然后才能计算黏土层所代表的时间有多长。那年以前，父亲曾建议利用在大气中以恒定速率形成的铍 10。然后他产生了一个同样通用的新想法——陨星尘的沉积速率是不改变的。大陨星会偶然陨落到任意地点，但是来自外层空间的细陨星尘将会连续不断地像真正的光一样洒落到整个地球，假如能计算出黏土层中及平常的斯卡尔亚石灰岩中陨星尘的数量，我们就知道了黏土所代表的时间。

这是很困难的事！当陨星尘这种显微镜下才能看见的极细颗粒偶然落到你的手上或头上时，你不会知道它的存在，我们当时也没办法从古老沉积物中提取陨星尘称出其重量。但是有一个化学方法。父亲认为，我们能利用其中铂族元素之一对黏土进行分析。³ 在陨星中，这些元素虽然远非丰富，但其含量已足以被测出。由于地球与陨星都起源于凝聚成太阳系的旋转尘埃气体云，所以作为地球整体必定与陨星大体包含着同样份额的铂族元素。可是地壳与沉积物中的铂族元素含量远低于陨星的。这是因为这些元素被铁吸收了，地球有一个硕大的铁质内核，铁核中地球的铂族元素的份额必定有所浓缩。其结果是，地球表面的沉积物中铂族元素虽然已被严重耗尽，不过刚好能用最灵敏的技术直接检测到。

我们推论出,在斯卡尔亚的沉积物中,陨星尘经过数千年的缓慢累积,会成为铂族元素的主要来源。如果那里的黏土层是经过几千年时间才沉积而成,那么已有充分时间足以使铂族元素累积到能检出的总含量,但是如果黏土层只是在几年之内快速沉积而成,就将完全不含这些元素。

父亲根据他的物理学知识,认识到中子活化分析是进行该项测量的合适技术,当他研究6种铂族元素的性质后,就清楚地认定了铯元素是最适宜于这一工作的。我们是幸运的,因为弗兰克·阿萨罗(Frank Asaro)也在劳伦斯·伯克利实验室工作。弗兰克是一位核化学家,许多年以前他发展了利用中子活化分析研究古陶器的技术,我们希望他能测定铯元素。父亲和我去拜访了弗兰克。

弗兰克·阿萨罗

要想理解弗兰克的分析工作,我们需要再次变换计量单位,就像我们在第二章把年转换为百万年那样。在弗兰克这样的化学家分析一块岩石样品时,需测定其中每种元素,还要公布它在整个样品中所占的份额。就“主要元素”而言,份额表示成百分数,即百分之几,所以一块特定的岩石可能含铁5.6%。主要元素之外,细致分析要测定某些“示踪微量元素”,含量极其稀少,往往用百万分之几,即ppm来表示。像中子活化分析这样真正的高新分析技术,能使微量元素的测量达到10亿分之几,即ppb的水平。在想像示踪微量元素浓度时,可采取一些心理上的调整,我是这样做的:地球上的总人口约有50亿,所以每5个人就构成1个ppb。它可以帮我体验1ppb的真正微小浓度代表什么。

你可能会问,为什么有人要关心那样低的浓度。地球化

学家发现稀有示踪元素就像犯罪案件中的罕见指印,它能揭示过去有关事件的最有用的情节。我们对此尚一无所知,但弗兰克利用铀测定所能做到的事就类似这种情况。

像弗兰克这样的科学家如何可能测出 ppb 级的浓度? 中子活性分析是怎样工作的? 设想把全世界的 50 亿人口都集中到广阔的旷野上,你打算找出某天在特定的某一秒钟时间里所出生的人口占多大份额。答案将会是 10 亿分之几,但测量起来是极其困难的,除非……除非或许你能安排这极少数的每个人都手持一只强大聚光灯,你还能做到在晚上乘上气球漂浮在人群上空对光束计数。

这个粗略比喻,正是中子活化分析工作的道理。将岩石样品放入核反应堆中,用中子照射。岩石中原子吸收中子而形成不稳定的原子,于是它们开始放射性衰变。这便称做中子活化分析中的“中子激活”。不稳定的激活原子衰变时,发出一束 γ 射线——强光的单个光子。发自各种元素的光子均具有特定的特征能量,成为该特殊元素存在的标志。弗兰克有一台检测器,能记录通过它的(譬如说)具有激活铀特征能量的 γ 射线计数,每次计一束 γ 射线。在中子活化分析中这称做“分析”。弗兰克对铀元素的分析正是基于对光束的计数。

原理不难理解,但做分析确实很困难。有各种各样的犯错误与得到错误答案的可能。⁴ 需要进行各种校准,仪器可能失灵,尤其是在 ppb 级精度上,污染问题成为主要危险。⁵ 人们几乎必须像病态般地细心谨慎才能把工作做好,在这件工作上弗兰克是最擅长者之一。我把他看作在智慧特质上继承第谷·布拉赫(Tycho Brahe)的人,第谷是一位在丹麦文艺复兴时期不辞劳苦的贵族,有了他对行星在天空的位置所做的大量精确肉眼测定,才有开普勒(kepler)对行星轨道的确定,后来又导致牛顿揭示了运动定律与万有引力定律。由于弗兰克在

习惯上和言谈中总是追求精确,用反间谍具有的无情态度搜寻出潜在的错误,再三检查每件事后,还要进一步检测,假如他的数据出现错误,他会深深自责。这些性格特点还把他造就成了一位难以战胜的纸牌游戏高手,他与他的妻子露西尔(Lucille)双双成为桥牌终身大师。或许是作为一种补充,弗兰克的办公桌是我曾见过的最杂乱的办公桌之一!

显然如此苛求的工作不是任何人都能应付得了的,但是潜在的回报却非常巨大。当今我们所以能知道是什么原因造成恐龙灭绝,就是因为有了弗兰克·阿萨罗做出这些非凡的测量的才干。

弗兰克热情地接待了我们,并恳切地听了我们的想法。随即向我们说,他早已同美国地质调查局的安德烈·萨尔纳-武伊齐茨基(Andrei Sarna-Wojcicki)有所接触,这是一位研究遍及美国西部的古火山灰地层的地质学家。⁶ 安德烈早已认识到铀可以作为沉积速率的一种指示剂的可能性。还曾提出对土壤中的铀进行测定,据推测它大概来自微陨星,因而可以作为测定土壤生成年代的一种方法。这个计划被搁置在不重要的位置上,而直到弗兰克同安德烈经过检验确信这两项实验不重复之后,他才同意跟我们合作。

弗兰克不认为他对我们能有所帮助。他曾对来自考古场所的陶瓷碎片进行了 15 000 次的分析,很少检测到铀。所幸弗兰克觉得这个想法很有趣,同意对我的十来个样品做分析。⁷ 我细心地选定样品,其中有的选自黏土层,有的选自紧靠石灰石岩层上下,有的选自岩层很下方,以便比较。

十亿分之几的意外收获

我于 1977 年 10 月份把样品交给了弗兰克,几个月都听

不到消息。中子活化分析是一种不得不长时间等待的缓慢技术,加之弗兰克的设备已经老化,而且还堆积了不少有待检测的各种样品。过了好几个月,又是好几个月,直到1978年6月下旬,我终于接到父亲的电话说:弗兰克最后还是完成了分析,结果完全出乎意料,弗兰克希望同我们会面。

父亲和我走进弗兰克的实验室,看看到底出了什么问题,弗兰克把结果展示在我们面前。假如黏土层是缓慢沉积而成的话,我们原来期望的铀浓度为0.1ppb,假如是快速形成的话,就根本不会有铀。我们从未预料到,弗兰克实际上在黏土层的一部分中找到3ppb未溶于酸的铀。当然3ppb的铀是个极其微小的总量,但却是一个远远大于我们用上述两种过程作解释所应具有的数量。何况后来弗兰克还发现,在用酸处理样品的过程中有些铀已被带走,所以最终数值是9ppb。

黏土层中的全部铀元素是从哪里来的?可能会很快出现一个闪念:它会是来源于超新星吗?罗素和塔克曾提出这个超新星假设来解释恐龙灭绝的原因。它会是来源于小行星或彗星的碰撞吗?或者,能提出一个非灾变性的解释吗?也许能想办法把铀的存在解释为来自海水沉淀,以及地球可能遭遇过星际尘埃与气体云等等。什么能圆满解释全部的铀呢?

丹 麦

在投入许多精力提出假说并对其验证之前,我们需要弄清楚铀异常现象是仅限于古比奥周围的岩石层,还是KT界线上的全球性特征,如果是后者则将成为全球性大规模灭绝的决定性线索。显然,我们无法立即检测出该异常是否确属全球性的,但觉得应该至少在远离意大利的另一两个KT界线上做出铀分析。

于是我到图书馆去查询另外的 KT 地点。现在看来非常有趣,当我们得知已经在全世界发现了铀异常的有一百多个 KT 地点后,记得当时即便决定一个取样地点也是如何的困难。越过 KT 界线处几乎没有连续的地层学报告——这当然反映着赖尔的老观点:KT 界线代表着地质记录中的一个巨大的间隙。近处的唯一候选地点在丹麦,它在哥本哈根南,那里有一个隔开麦斯特里希特期和丹麦期的白垩质石灰岩的黏土层,暴露在叫做斯蒂文斯克林特的峭壁上。

斯蒂文斯克林特似乎是我们寻找另外的 KT 界线的仅有的可能地点。在科学生涯中难得的幸事之一便是你所能建立的世界范围内朋友及同事们的关系网。于是我打电话给索伦·格雷格森(Soren Gregersen),他是我在拉蒙特认识的一位丹麦地震学家。在我从意大利野外测量现场回国的路上,索伦在哥本哈根机场迎接我。我们与丹麦古微生物学家英格尔·班(Inger Bang)一同驱车到斯蒂文斯克林特那里,爬下峭壁,来到这黏土层跟前。

立即看出,显然在该黏土层沉积而成时当地的丹麦海底发生过某种令人不愉快的事情。峭壁的其他地方都由一类称为白垩的软石灰岩构成,其中包含着各种各样的化石,代表着曾是充满生命的兴旺的海底。但是黏土层不光颜色发黑,散发着硫磺臭味,而且除了鱼骨头之外没见有化石存在。在这个“鱼黏土”所代表的时间间隔里,兴旺的海底已转变成无生命、污浊、缺氧的坟场,只有死鱼在这里不断地缓慢腐烂着。在岩石记录中像这样的缺氧沉积,并不是不常见的,但通常它们只反映当地的局部情况。这个丹麦的鱼黏土层能代表 KT 灭绝时期海洋中整个世界范围的灾难吗?铀测量将会作出回答。索伦、英格尔和我从黏土层以及其上方和下方的白垩中搜集到许多样品。弗兰克对这些样品作了分析,他在鱼黏土

中发现了异常的铀浓度。

根据欧洲的两处情况,我们不敢断言 KT 铀异常就是一个世界范围的普遍特征,但至少不是古比奥的局部的特殊之处。虽尚未确定,但我们不知道世界上还有什么其他地点有能让我们寻找到铀的越过 KT 界线的完整剖面。或许这就是我们迄今所能找到的全部。是对铀异常思考一个全球性解释的时候了。

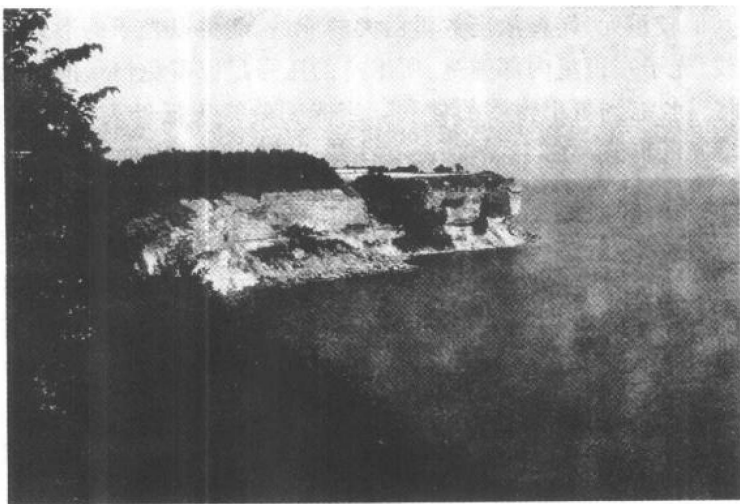


图8 斯蒂文克林特峭壁,在丹麦的哥本哈根附近。峭壁向下倾斜的较低的一半为白垩纪地层顶层,陡峭的上部为第三纪地层的最低层。

比银河系还亮

手边就有一个现成的解释。或许霸王龙以及其他 KT 灭绝的全部遇难者是被来自一颗超新星的辐射杀害的。在科学著述中早有这种说法,⁸但只是推测并非定论,因为迄今没有

任何人发现 KT 超新星的什么证据。我们首先想到的是,古比奥和斯蒂文克林特的铀可能提供了这种证据。

在日常生活中没有为我们提供产生超新星概念的基础——认识到一颗恒星(另一个太阳)会突然爆发。天文学家们从未有过地质学家们对平静发展的均变论偏爱的看法,超新星确实是壮观的大灾变。

正常恒星的发光是由于恒星中心氢原子核聚合形成氦与其他较重元素,释放出数量巨大的能量,能量以光子的形式释放,光子在恒星内部弹跳,所维持的压强足以避免恒星的重力将其收缩到更小得多的体积。当光子最终飞抵外表面时,以星光的形式冲向宇宙空间,有些星光照射到像地球这样的行星上。

恒星稳定地在宇宙空间照耀着数百万年或数十亿年,但是在它们的燃料耗尽后也会死亡。在接近它们的末日时,恒星通常会逐渐变暗并慢慢消失,但有些恒星会以突然灾变的方式死亡。当氢燃料最后耗尽时,维持的压强会消失而使恒星终于发生坍缩——一旦没有压强,坍缩极其快速。突然失去支撑的全部恒星质量都落向其中心。部分恒星物质从堆积在中心的物质上反弹出去,剧烈地抛向周围宇宙空间。这种恒星爆发剧烈无比,所形成的超新星短暂的光亮超过它所在星系的全部数千亿颗恒星的光亮!⁹

超新星将瞬间毁灭环绕在它周围的行星上的任何生命,但是如果没有超新星的话,生命本身也不会存在。大爆炸创生的原始宇宙几乎完全由氢与氦构成。所有的其他元素都是在恒星内部由核聚变后经过恒星爆发抛洒到宇宙空间去的,多岩石的地球以及我们的主要由碳元素构成的身体,大部分是由这种爆发所产生的恒星灰烬组成的。超新星使生命的产生成为可能,但是如果太阳邻近的一颗恒星变成超新星那就

大灾难临头了。地球表面将浸泡在致生物于死地的危险辐射之中,气候也会严重混乱。

幸亏,在附近的超新星 10 亿年左右仅发生一次,而且这类事件并不见得一定会发生。超新星恰好能对 KT 灭绝这样一件真正稀罕事件给以解释。因此,罗素和塔克于 1971 年提出的说法具有重要意义——很可能是超新星杀害了恐龙。这个说法在天文学家们听起来很有道理,他们拍摄到了超新星,物理学家们也能理解核过程会造成恒星爆发。这个学说不合地质学家的胃口,部分原因是因为不符合他们的均变论传统,还有部分原因是,因为在岩石记录中地质学家从未见到过一颗古代超新星打上的印记。超新星会在岩石记录中留下什么类型的印记呢?

作为超新星记录器的古比奥黏土层

至少有两个地点正好在灭绝的地层上存在着铀异常。它能成为超新星的证据吗?比氦重的所有元素都是在恒星中产生的,并且是由超新星爆发散播到周围的。铀元素就是其中元素之一,因此异常的铀可能来源于超新星。我们如何才能对这个观点作出检验呢?父亲认为,除了铀元素之外,一颗附近的超新星也会使恒星演化过程中产生的钚 244 沉积在 KT 黏土层中,所以通过分析 KT 黏土中的钚 244 就能检验这个超新星假说。钚元素的这个同位素是放射性同位素,其半衰期为 8 300 万年,因而自从地球诞生以来已经过了许多个半衰期而使得所有的原初钚 244 早已衰变干净了。¹⁰而从 6 500 万年前的 KT 界线起只经过了比一个半衰期略短的时间,所以假如由邻近地球的超新星在 KT 界线沉积了钚 244,利用中子活化分析就能检测出来。

到这时,弗兰克的同事海伦·V·迈克尔(Helen V. Michel)¹¹已加入我们的研究小组,帮助弗兰克进行分析工作。海伦是一位技术熟练的钷化学专家,在对KT黏土的新测量计划中她是领导人。采用中子活化法分析钷244比分析铯元素更加紧张得多,这是由于人们必须不停顿地工作,做好化学分离并在 γ 射线全都消失之前对它们记数。于是海伦和弗兰克同我的父亲与米莉没日没夜地连续奋战,我就担负着给他们送咖啡和炸面包圈的任务,当曙光在室外初现之时,终于完成测定得出结果,于是……

KT界线黏土中确实存在着钷244!父亲和我兴奋得几近欢呼雀跃——是一颗邻近的超新星杀灭了恐龙!这真是个巨大发现。海伦和弗兰克已经太累了,只是满意地在打瞌睡。

像这样的爆炸性发现你将如何对待?父亲准备立刻公布出去。我担心枪走了火,弗兰克和我一同去看望厄尔·海德(Earl Hyde),他是一位像弗兰克那样的核化学家,身任劳伦斯·伯克利实验室副主任的职务。我们去向他征求建议,厄尔倾听过弗兰克对整个实验过程的详细叙述之后,给我们提出了一个过去从未得到过的最好建议:“通盘再做一次测量,”他说。“选取一个新样品,从开始到结束把每一步都重做一遍,做到绝对保证该黏土中确实是有钷244。”

再一次不辞劳苦地做岩石样品的仔细的化学准备。再一次辐照,再一次在实验室没日没夜地做一轮实测计算工作。吃掉更多的炸面包圈和喝去更多咖啡。在另一次黎明时刻,终于又取得了新的结果。当我们以怀疑的目光盯着看这些数目字时,感到震惊和失望的苦涩。这次在黏土中根本没有钷244的踪影,什么东西都没有。对实验深入细致的分析明确宣布了超新星假说的行不通。在中子活化分析中,如果在样品中一次检测到某种元素而另一次没检测到,则后者的检测

是正确的,而第一次操作中肯定包含着杂质。因为如果那种元素真的存在的话,是绝对不会失去那些 γ 射线束的。¹²我们郁郁不乐地在那个清晨回到家里。感谢厄尔·海德拯救了我们,否则准会陷入不得不撤回一次令人注意的大错误所造成的屈辱蒙羞之中。

撞 击?

超新星假说放弃了。其他有什么原因能造成KT灭绝呢?我们必须经常提醒自己,铱异常与浮游生物有孔虫的近于灭绝的证据符合,再无更多的(证据)了。但是很难避免想到还有像恐龙灭绝的事件,有孔虫灭绝事件的突然性让我们倾向于考虑罗素的异端观点:恐龙也是突然灭绝的。重新审查过古生物学文献之后,罗素估计几乎有一半动物、植物和单细胞生物的种属在白垩纪末期消失了。¹³不久,罗素的估计被一项详细的化石数据库所替代,该数据库包括了由文献中搜集到的大量海洋无脊椎动物的化石资料。它是由芝加哥大学的塞普考斯基(Jack Sepkoski)汇集并由他和他的同事劳普(David Raup)作出分析的。¹⁴劳普—塞普考斯基的工作非常清楚地表明,KT事件涉及到生物体的广阔范围,灭绝的发生是同时的或接近同时的。

事已如此,还顾虑什么?我们开始将问题作如下简洁表述:“地球以外的什么事件能造成地球上半数生物种属突然灭绝,同时还存留下来泄露天机的铱异常呢?”这就引起我们与许多古生物学家间的纠缠,他们认为一个地质学家、一个物理学家和两个核化学家不应侵入别人的科学领域。另一些古生物学家,像古尔德(Steve Gould)、塞普考斯基和劳普,则欢迎这种介入,并着手搜索古生物学上的可能暗示。

我们首先注意到超新星假说,是由于它早已被罗素和塔克以及我父亲的老朋友、物理学家鲁德曼(Malvin A. Ruderman)等人讨论过,但是也存在着另一个可能性,可能造成铌异常和生物灭绝的地外事件是一次巨大的撞击。

回想起来,我不再能记得 KT 撞击的想法是什么时候第一次想到的。甚至像我这样一个经过均变论的熏陶和做着均变论板块构造方面工作的地质学家,也已觉察到月球和行星地质学家的小小群体对撞击坑感兴趣。有一次,我曾受邀参加一个关于行星地质学的讨论会,做了有关意大利火山作为火星火山的类似物的报告。在那次讨论会上,听到了许多关于月球上和行星上的撞击坑的报告。在另一次会上,我曾被一幅迪茨(Robert Dietz)制作的图象所吸引,¹⁵ 图象显示的是一张地球上的撞击坑分布图。迪茨、尤金·苏梅克和另外数人就把它归因于撞击的产物。

像尤金·苏梅克和迪茨这样的提倡撞击说的地质学家在很大程度上被忽视了。登月成功后对于把月球上的环形山归因于撞击已不再有更多异议,但那些环形山的大多数显然是十分古老的。几乎没有地质学家接受这样的看法:在地球史的最近 5 亿年(这个时期有助于对地球史的详细研究与理解的化石很丰富)来的任何时候,地球上受到撞击是一个重要实际过程。地球表面确实有许多多环形山,但它们几乎都是火山爆发的产物。迪茨和尤金·苏梅克所谈论的是与任何火山形成的岩石没有联系的特殊环形山。绝妙的例证是亚利桑那州境内的“陨星坑”,尤金在这里已经找到确属起源于撞击的令人心悦诚服的证据。¹⁶ 传统的地质学见解把这类环形山归因于随时随地无缘无故发生的神秘的火山爆发。¹⁷ 回想起,这个凭空产生环形山的机制与变魔术几无差异,而当时许多地质学家更趋向于将这种环形山考虑为灾难性碰撞造成的。

我相信父亲、弗兰克、海伦和我都在努力了解铱异常的意义,我们不时谈到有一次巨大的撞击,但不能理解为什么一次撞击就能造成世界范围的生命灭绝。无疑爆炸会摧毁附近的生物群,但远处的动物将幸存,并会很快到荒废的地区重新繁衍。撞击发生在海洋中将引起巨大海啸,但这种海啸会局限在个别海洋,作用不能波及全世界。超新星的说法似乎更有道理,因为它将把整个地球浸泡在致命的辐射之中,所以能对灭绝的全球性作出合理的解释。然而,超新星假说已成过去,而撞击的说法似乎又提不出全球性的杀灭机制。在一年多的时日里我们一直在探索和讨论,却总以失败而告终。夜里我清醒地躺在床上头脑中总是这样想:“在生物灭绝与铱元素之间必定有一种内在的联系,能是什么样的联系呢?”

1979年的夏季,我在亚平宁山脉做古地磁研究的期间,父亲正在寻找全球性杀灭机制上勤奋地苦苦钻研着。日复一日地,父亲沉浸在设想出灭绝演进过程上,并让弗兰克·阿萨罗、马勒以及他的另一位年轻同事安迪·巴芬顿(Andy Buffington)一同参予这些过程的严密试验。每一个设想出来的过程都有某种缺陷而必须放弃。

那个夏天,父亲用去大量时间同伯克利的天文学教授克里斯·麦基(Chris McKee)交换意见,正是克里斯促使我的父亲认真地选择了撞击观点。最后,父亲开始考虑关于由撞击抛向空气中的尘埃的情状。他想起了阅读过的一本书上所描述的景象。印度尼西亚的喀拉喀托火山在1883年爆发时,将大量尘埃与灰烬喷射到大气层中,竟使得地处地球另一面的伦敦数个月之内观赏到辉煌的彩色落日景象。他追寻到了记忆中的那本书。¹⁸父亲考虑到,把喀拉喀托火山喷发事件扩大到一次巨大撞击的规模,则喷溅到空气中的尘埃数量之大足以使整个世界陷入黑暗。失去阳光,植物会停止生长,整个食物

链被毁掉,其结果将是生命的大规模灭绝。对于回答为什么一次巨大撞击会造成全球性大规模生物灭绝,这是首选的完美假说。父亲竭尽全力在他的尘埃加黑暗的过程情节中看是否能找出错误。他尽量算出所产生的尘埃总量和黑暗会达到什么程度。直到弗兰克、马勒和安迪从计算中找不出错误,父亲也从中查不出错误为止。他带着兴奋的心情,来到电话前给在意大利的我通了消息。

返回丹麦

“我们已经得到答案了!”父亲告诉我,“你必须在丹麦宣布出去。”9月份在哥本哈根有一个关于KT界线大灭绝的大型会议——这是对一个很少有人关心的问题产生了兴趣的不寻常征兆。在我的野外作业季节结束时我去到那里,发表了铍的测定数据以及我们对超新星假设检验的否定结果。父亲当时强烈地偏爱着由于巨大撞击产生的尘埃而形成的暗无天日后果引发了大灭绝这一观点。他相信哥本哈根会议上的每个人都将愉快地得知恐龙为什么消失。

我比父亲更了解地质学家和古生物学家,我更加相信将出现强烈的反对意见,甚至是敌对的行为,对这样一个非均变论的解释很多人不会接受。更重要的是,我还没有进一步发展和审定撞击—尘埃过程的情节,我自己也还未能立即信服。在超新星假说上我们几乎犯下一个严重错误的事记忆犹新,一次侥幸脱险已经足够了!我告诉父亲,我将按照我们原来的计划发表铍异常的报告,并指明它不是由于超新星造成的。对于撞击和尘埃的证据,我们应该在我回到伯克利以后再小心地进行评价。

哥本哈根会议将是一次巨大的考验。这次会议之前我们

对铀异常已作过简短的报告,在出版物上已有过报道,但至此还未曾在精于专业的听众面前公布结果。哥本哈根充满了真正懂得 KT 界线的人们。他们会怎样看待我们的铀异常报告呢?当我在哥本哈根走下飞机时,意识到辩论即将开始。不过尚且猜不出辩论的规模和激烈程度。

扬·斯米特在哥本哈根

会议第一天午餐排队时,我发现身旁一位身材高挑的金发年轻人操着动听的荷兰口音介绍了他自己,他名叫扬·斯米特(Jan Smit),从阿姆斯特丹来。他又说:“我在《新科学家》杂志上读过有关你的铀异常的叙述,我想对你说我已经证实了你的发现。我在西班牙的卡拉瓦卡发现一处十分完整的 KT 界线剖面,其中也存在着铀异常!”这是铀异常的全球性的更进一步证据。我们深厚的友谊就是从这一幕开始的,它把我们一起带入后来 15 年的激烈学术论争之中。

过了若干年后,我才完全了解隐藏在扬的开场白背后的诚实正直程度。在选作为哲学博士学位论文的对西班牙南方岩石记录的研究中,扬对卡拉瓦卡的 KT 界线上有孔虫突然灭绝曾大为着迷,这很像我在古比奥的经历。为了寻找 KT 事件的化学线索,他曾接触过比利时的中子活化分析家赫托根(Jan Hertogen),也像我们在伯克利曾接触弗兰克·阿萨罗那样。赫托根已发现存在高铀含量,但当时扬正患单核细胞增多症,不适于查看这些化学数据。当他的身体正在康复时无意中读到了关于我们所做工作的文章,在打印资料中寻找到了铀的数据,这就是直接的确证。

有些科学家或许已经打算要求承认一项独立发现,或尽快抛出一篇文章确立优先发表地位。但从我们相遇的时刻开

始,扬就把他的分析当作我们的发现的一项证据。这正是科学家们所渴求的高标准道德行为,它也是使得科学界的合作奋斗成为可能的重要前提,但是由于科学家也是平凡的人,这种高尚的品德境界并不常遇。假如我们调换了角色,我愿意同样具有扬的那种行为品格。当时我对全部研究过程的情况了如指掌。我认为扬·斯米特是撞击证据的一位共同发现者。

所以扬和我深信,我们发现的铱元素就是某种重大地外灾变的证据,可是在哥本哈根我们听到种种均变论的观点后,开始觉得要想说服其他地质学家和古生物学家还得需要详细证据并展开广泛的争论。

发 表 论 文

回到伯克利,我们的研究小组投入了发展和检验撞击理论的任务,同时着手写出论文以便发表。因为都在谈论铱异常并且还有其他实验室正开始分析 KT 界线沉积物寻找铱元素,这就把我们置于越来越大的压力之下。在撞击假说中,我们找不出有什么严重的矛盾,在最后时刻罗素寄来了他在新西兰收集到的 KT 样品,该样品也显示存在铱异常。1980 年 6 月,我们的论文终于发表在《科学》杂志上,在科学文献中正式地建立起来了铱异常的学术理论,¹⁹差不多立即就出现了另外三篇关于 KT 界线铱异常的文章。斯米特与赫托根给出了他们的卡拉瓦卡的铱异常报告。²⁰凯特(Frank Kyte)、周志明(Zhiming Zhou)与沃森(John Wasson)在加利福尼亚大学洛杉矶分校证实了斯蒂文斯克林特的铱异常现象,还在深深的太平洋岩芯找到一处新的例证,²¹以及贝克化学公司的加纳帕蒂(R. Ganapathy)也证实了斯蒂文斯克林特的铱异常现象。²²

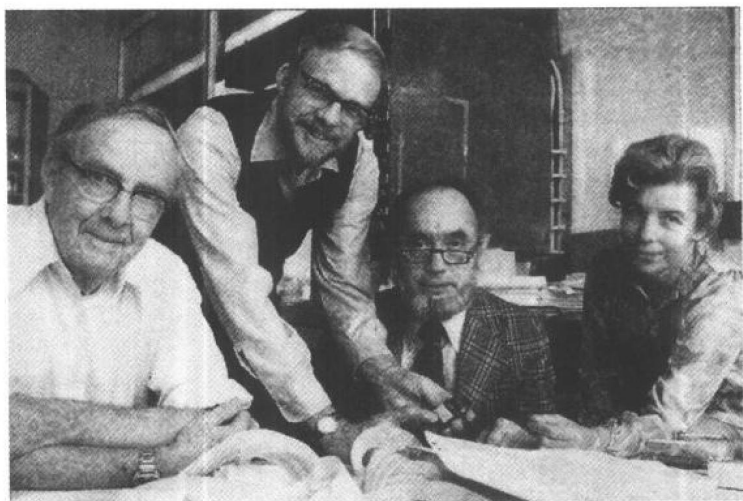


图9 约1980年在中子活化实验室工作的伯克利小组。
由左到右为路易斯·阿尔瓦雷斯、沃尔特·阿尔瓦雷斯、
弗兰克·阿萨罗和海伦·迈克尔。

所有这些地点都在海洋沉积岩中,于是有些怀疑论者提出铀原本出自海水。可是到了下一年,洛斯阿拉莫斯的奥思(Carl Orth)在新墨西哥州的一处非海洋性成煤木本沼泽岩的黏土层中找到铀,楚迪(Bob Tschudy)由花粉研究指出它确属KT年代的产物。美国地质调查局的皮尔莫尔(Chuck Pillmore)还在附近找到另外几处的KT露出地面的岩层。²³成煤木本沼泽岩中的异常表明铀并非来自海洋,这个例证有力地支持撞击说。

然而,问题并未定论。科学假说须经受怀疑论者的激烈批评和严格的检验。严酷考验即将来临,撞击假说确实会经受严格考验。

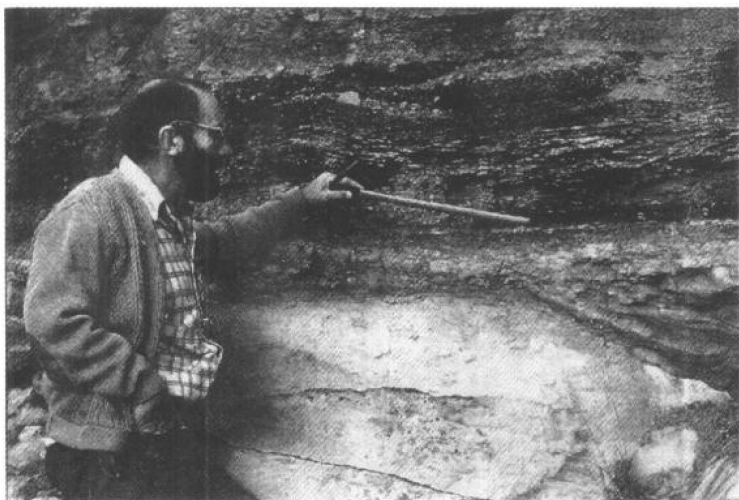


图 10 皮尔莫尔正在指点沉积在海平面之上的 KT 撞击碎屑的白色薄带。这是他在科罗拉多州和新墨西哥州的拉顿盆地内的克利尔克里克发现的。

第五章

寻找撞击地点

1979年9月的哥本哈根会议和发表于1980年的有关铀异常的论文,激起了争论白垩纪—第三纪之交生物大规模灭绝问题的风暴,而且席卷了整个80年代。包括我们在内,我们自己觉得就像是一些试图解决一件异常艰难的疑案的侦探似的。而罪行发生在很久很久以前,案件证据的线索已渐渐变得淡漠、令人沮丧。随着我们为理解到底曾发生过什么事件而奋斗的进程,几乎越来越感到狡猾的大自然似乎故意设计了一个迷津,扑朔迷离、误导的线索和错误的踪迹层出不穷。

侦探们的集会

大自然的奥秘对于科学家们有不可抗拒的吸引力。当前遇到的铀异常现象,不但千真万确,而且很可能是全球性的现象,撞击假说使千百个科学家着了迷,他们丢下手头的一切工作,开始为寻找造成灭绝事件的新证据而奔波。在20世纪80年代的10年里,有关这一主题的科学论文就发表了2000多篇,¹几乎每月都有惊人的发现。

很少有过一个科学问题从如此多的完全不同的学科吸引来许多研究者这样的情况。因为事关解读地球的历史和对均变论教条的挑战,所以地质学家和古生物学家自始至终扮演着主角。分析化学家、矿物学家以及地球化学家加入了对KT界线地层的分析和对微妙的化学证据的解释。天文学家们认

识到他们对彗星、小行星以及轨道动力学的理解对问题的解释具有决定性的重要意义。

由于该事件瞬间释放的能量相当于全世界核武库的 1 万倍,从而所造成的环境条件绝不能在实验室中重现,因此并没有现成的计算方法,于是物理学家也参与了研究。大气科学家们就大撞击对空气的化学构成与环流运行的物理和化学影响进行了计算。古生物学家们在遭难的生物与幸存的生命中寻找规律与模式,以便弄清楚杀灭的机制。统计学家们探索的问题是,从十分不完整的古生物学资料中能引出什么样的可靠推断。

每个不同的学科都有自己的学术传统,自己的知识主体,以及独特的专用术语,这许许多多差异形成了通常专家们冲破学科界线共同合作的阻力与障碍。如果我们让这些障碍盛行的话,对 KT 灭绝的了解就不会取得什么进展。

有两个人很快地认识到该项工作的跨学科性质,急需沟通不可避免的信息隔阂。亨特(Lee Hunt)和西尔弗(Lee Silver)将各不同学科的专家同事组成一个小组,²他们在一个无雪原与滑雪者的秋天,在犹他州的斯诺伯德,于 1981 年召集了会议。该小组把会议专门设计成让我们大家相互传授不同学科的知识信息,他们还设置了辅导班,在班上让古生物学家学习撞击的有关物理知识,天文学家学习有关岩石记录的解读法。³

首次斯诺伯德会议诞生了一种独特的科学文化,从此一个学科领域的专家不再害怕过问较远学科的最基本问题。人们不再被专家们常用的局外人不理解的专门术语所阻隔。在该项研究中跨学科对话成为特别享受,我们实现了对各种科学传统中很不相同的社会习俗及用语的相互理解与共享。⁴物理学家马勒,核化学家弗兰克·阿萨罗和天文学家库达巴克

(Dave Cudaback)全都来到我在皮奥比科城的意大利总部,同我一起在野外工作,同时学习地质学。父亲也访问了皮奥比科和古比奥,他是同我的继母简(Jan)、兄弟唐(Don)和妹妹海伦(Helen)一道来的,他观看了旷野上的岩石,那是让他在实验室里长期保持浓厚兴趣的样品。作为回报,我花时间同他们一块儿学习天文学、化学和物理学。跨学科研究组的方式传遍了全世界。科学上的互相介入已成为需要坚持的事物,应在其他领域予以考虑。如此众多的学科共同合作得无比协调的事,在其他任何研究领域我还未曾听说过。

把关于白垩纪—第三纪界线的争论总是描述成文雅友善



图 11 马勒和沃尔特·阿尔瓦雷斯在古比奥的 KT 界线的岩层露头处。凿岩锤正落在白垩纪岩层的顶层,由于许多地质工作者掘取样品,覆盖在 KT 界线上的黏土显得斑斑驳驳。上部左侧较暗岩层为第三纪的最早沉积物。造成亚平宁山脉的地壳形变已使这里的石灰岩层向左边倾斜。

的,会导致误解。地质学与古生物学上根深蒂固的均变论根基处在被攻击的地位。强烈坚持的观点一直受到来自多方面的挑战,新的信息迫使我们大家不断修正自己的解释和发表的见解。不同学科的极不相同的传统与方法被迫达成共存,持不同看法的各方也曾多次发表过后来感到遗憾的言论。公众感到兴趣和出版界紧跟事态发展的现实常使未深思熟虑的评论所产生的影响被夸大其词。⁵ 新闻工作者乐于报道分歧与对抗,而科学家们多受益于虽激烈却相互尊重的学术争论。我们没能将挑衅性言论完全杜绝,在少数情况下尖锐的攻讦也曾发生,但我认为就整个这次学术争鸣说来,在争论的全过程之中始终有理智地保持着相当高的文明水准。

对一项调查的事后分析

因为有如此之多的人员竭尽全力,很多科学分支的介入和各种各样证据的交错印证,关于白垩纪—第三纪大灭绝的探索研究的过程情节,在整个 20 世纪 80 年代显得错综复杂。打算重新概括整个事件的话,无论是谁都必须选定一个把那许多素材有效组织起来的办法,决定怎样取舍。⁶ 该过程的情节已被谈论过不少次,⁷ 通常把该过程表述为相信撞击证据的科学家与主张火山作用才是大灭绝原因的科学家之间的争论。我宁愿用一个不同的提法表述这个问题。我认为应当把焦点集中在撞击坑的探寻上,如果撞击假说正确,撞击坑必定已经存在,必须认真考虑为什么寻找撞击坑如此之难。

作为科学家,我们从事的是同大自然对话。通过观察和实验,我们提出这样的问题——“撞击坑在哪里?”而大自然的答案就来自观察和实验的结果。这似乎是一桩很直接了当的事情,但是实际做起来却非常困难。刚开始做研究的年轻科

学家,想像不出理解大自然的答案的真实意义有多么困难,也估计不到会没完没了地犯错误与受愚弄。

寻找撞击坑为什么这样困难?回想起20世纪80年代的研究历程,大自然简直就像个技巧精熟的侦探小说作家,不断设置一系列尽量误导读者的线索。如今,撞击坑已经找到,仍当作悬而未决的凶杀神秘故事来谈论已为时过晚,因此让我改用对该项奥秘的解决做事后分析的方式来评论,我将基本上按照年代先后顺序尽量把研究活动的主要头绪梳理清楚,特别指明我们曾多次导致错误推断或误入歧途。在使我们谦虚方面,它确属有益的教训。

最初的疑难问题 ——确实存在需要阐明的突然大灭绝吗?

探寻撞击坑刚刚开始,就有些科学侦探认为我们误入歧途了——根本没有发生过这等怪事!他们的观点是,恐龙是因某种自然原因渐渐消失的,即便真的发生过一次大碰撞,也与恐龙灭绝无关。

最熟悉化石记录的古生物学家们,尤其是精通恐龙与哺乳动物化石记录的专家们广泛地持有这一观点。在这样一些怀疑论者中最突出的人物始终是我的伯克利同事克莱门斯(Bill Clemens)。⁸他和他的学生们曾在蒙大拿州的东部工作过多年,那里是恐龙时代恰好结束时地层学记录保存得举世最好的甚至是唯一的地方。解释这儿的记录甚为不易。最晚出现的恐龙生活在一片河流交错的泛滥平原上,河流冲刷迂回蜿蜒的河道,当河曲横越平原迁移时这些河道便为淤泥沉积而阻塞。它们使得理清事件的先后顺序变得复杂困难,恐龙化石的稀少造成了解读地层记录的难题,活着的大型动物比

小型动物更稀少,留存下来的化石同样更稀少。在穿越克莱门斯所研究的地域时人们能捡拾到大量的骨骼碎片,但这些碎片很可能是被古时的河流冲刷来的,因而不一定能表明恐龙就生活在该沉积物被封存地层的时间,只有关节相连的骷髅与骨骼仍一直堆积在最初的地点,才对恐龙的地层分布提供了可靠的证据,可惜这种情况甚少。

克莱门斯大体上了解恐龙灭绝时的地层层面在哪里。他细心搜集样品并把样品交给弗兰克和海伦,他俩从一座后来被称做铌山丘的无名小孤山上发现了铌异常地层。埋藏最浅的恐龙骨骼是在该地层下约3米深处。克莱门斯认为,这表明在由撞击造成的铌沉积之前,恐龙早已全部死亡。⁹

在对待骨骼的保存上,在对待完整骷髅与骨骼碎片的对比研究上,引发了一场大的论争。实际上不能期望找到生活在大撞击时刻的恐龙遗骸,而应当预期在最浅的化石沉积层与灭绝地层之间有一个实实在在的空隙。在加里福尼亚大学戴维斯分校工作的西格诺尔(Phil Signor)和利普斯(Jere Lipps)做过仔细分析之后指出,如果只保存下来少量的化石,则突然灭绝看来像是逐渐发生,这成为著名的西格诺尔—利普斯效应。¹⁰

在KT界线之上的一组完整的连在一起的骨骼将为恐龙并非由撞击杀灭的论点提供强有力证据,但尚未找到。另外,西格诺尔—利普斯效应还指出,随着越来越多的化石被发现,埋藏最浅的化石沉积层与灭绝层之间的表观空隙将会减小,最初的4米空隙确实已经减小到不到1米。我认为空隙缩小支持灭绝突然发生并与撞击同时发生的观点,可是所遗留下来的空隙仍然使克莱门斯怀疑是否撞击真的杀灭了恐龙。

同时在新墨西哥州由于某种原因根本没有恐龙骨骼被保存下来,皮尔莫尔在KT界线铌地层以下1米深处发现一个恐

龙脚印,而在 KT 界线上方并无恐龙脚印。这正是大灭绝的撞击理论所预言的。皮尔莫尔在 KT 界线以下发现的另一个脚印被首先识别霸王龙脚印的足迹专家洛克利(Martin Lockley)所证认。因为个别的脚印很难绝对确认是什么动物留下的,所以从假定留下该脚印的动物的足迹化石可定出出入不大的属的名称,而种的名称却可完全不同。洛克利是在该脚印发现者之后给该脚印命名的,这样一来,如果你被它吞掉,它便成了霸王龙。但是如果你被它踩上,它便是皮尔莫尔龙。这对皮尔莫尔是多么荣耀!

小块化石更为丰富,在化石记录中它比恐龙化石可能更精密地确定它们灭绝的地层层面。在 KT 界线上消逝的最熟悉的海洋无脊椎动物是菊石——现在的囊状鹦鹉螺的已经灭绝的亲属。在华盛顿大学工作的沃德(Peter Ward)是研究这类化石的权威专家,¹¹一开始在他看来似乎是在 KT 界线以前菊石已经消亡,但在西班牙北部详尽无遗地搜集了壮观的沿海化石露头之后,沃德能用一直到 KT 界线的菊石填充化石层与灭绝层的空隙,他于是把菊石的灭绝归因于 KT 撞击。然而,沃德研究的白垩纪无脊椎动物的另一个重要的种群——纤陶贝,似乎正是在 KT 界线以前灭绝的。演化的历史是复杂的——既非全部渐变也不是全属灾变——要想完全理解这段演化史还有大量工作要做。

更小和更丰富的化石是海洋地层中的单细胞有孔虫,以及陆地沉积物中找到的花粉。这类细小化石如此之多,因此并未出现像西格诺尔—利普斯效应那样的统计问题。在古比奥和卡拉瓦卡石灰岩中,每块捡到的岩石里都有成百上千的有孔虫,这些有孔虫微化石的近于灭绝发生在数毫米厚的由撞击造成的铍元素地层之内。在新墨西哥州的陆地沉积物中,丰富的花粉揭示了恰好在铍地层层面上某些种植物遭遇

突然灭绝,紧靠该地层上方蕨类植物骤然变得茂盛,表明撞击过后遭蹂躏的景观中盛长着这些抗灾害植物。¹²

在我和许多古生物学家以及地层学家这样一些有关的研究这些事物的专家看来,似乎该化石记录充分合理地说明了恰好在白垩纪末实实在在地发生了突然的大规模灭绝。¹³然而,活跃在研究 KT 事件化石记录领域的其他见多识广的古生物学家继续坚决主张灭绝是逐渐发生的。¹⁴这种不一致可能并不令人惊奇。解读化石记录的细节是很困难的,就彻底理解灭绝事件来说,对这些细节的研究将是有决定性作用的。

尽管存在着最初的古生物学疑虑,但自从 1980 年以来,KT 铱异常的事实就让我们中的一些人确信,寻找那个年代产生的巨大撞击坑是值得进行的事。一直没有找到这种撞击坑,它能隐藏在哪里呢?

格里夫的撞击坑表

直到 1980 年已经证认出近 100 个撞击坑。苏联和加拿大的地质学家在搜寻撞击坑上收获最多,这是由于在他们国家广阔的国土上经过漫长的时日暴露出非常古老的岩石,它们曾被撞击体命中的概率较大。加拿大地质学家格里夫(Richard Grieve)汇编成一张已确认的撞击坑表,¹⁵我们许多人极认真地研究了这张表,寻找哪一个有可能是 KT 撞击地点。为古老的撞击坑确定生成年代是一件困难的事,表上的许多撞击坑产生的年代很不确定。格里夫的绝大多数撞击坑都太小,最多只有几十千米大小,而据我们估计 KT 撞击坑的直径应该有 150~200 千米。表中只有 3 个撞击坑接近这一尺寸,但起码它们产生年代是明显错误的。看来 KT 撞击坑未必已找到。地球上为什么撞击坑这样少呢?

月球上布满了撞击坑,而地球上却很少。月球上的撞击坑大多数非常古老,它们是在太阳系早期大行星和天然卫星逐渐增长过程中遭受强烈轰击而造成的,由于月球太小便很快地失去了原有的内热、水和空气。在漫长的岁月中它一直仍然保持着原先疤痕累累的表面,有些像太阳系早期演化史的博物馆。

比较起来,大得多的地球至今内部仍然炽热,其内层物质在缓慢对流下连续不断地滚动,驱动着板块构造运动。此外,地球拥有冰、水以及空气,它们不停运动且连续地相互作用,侵蚀某些地域的基岩,而别的地方则被沉积物覆盖。其结果就是,使地球表面原来遭受猛烈撞击形成的遗迹未能保留下来。在太阳系碎屑大多被扫除干净后,撞击事件变得稀少并规模小。地球上少量撞击坑是晚近形成的。

KT撞击地点能隐藏在哪里?极其巨大的撞击坑定会深入人到撞击地点以下三四十千米的地壳与在其下面的地幔之中,如此之深的证据不可能被侵蚀殆尽。如此巨大的撞击地点裸露在视线以内而至今人们视而不见似乎是不大可能,所以看来有三个可能性:(1)撞击坑被晚近的沉积物覆盖了起来,或者在格陵兰或南极洲被冰掩盖起来;(2)淹没在海洋之中;或(3)已被海洋地壳的板块构造的俯冲作用所破坏。

案发地点——大陆还是海洋?

显然,首先要问的问题是:撞击发生在大陆还是海洋?对地质学家来说,大陆与海洋盆地是地球的地壳中基本的两种形态,仅仅因为一种位于海平面以上而另一种在海平面以下的话,两者不会有别的区别。但大陆地壳与海洋地壳在其化学构成与其岩石的矿物组成上是不同的。¹⁶

另外一个关键性的差别是,尽管大陆地壳碎块通过大陆漂移可以分离和重新合拢,然而大陆地壳却是持久的。但是海洋地壳却是短暂的,新海洋地壳会从分离着的大陆之间的地幔形成,古老的海洋地壳最终沉入地幔。其结果是,保留下来的海洋地壳不会老于约 1.8 亿年。大陆与海洋有如此之大的差异,所以大撞击发生在大陆或海洋上必将产生完全不同的岩屑并出现截然不同的后果。

地质学家从岩石的化学组成中能得到大量的信息。从上一章已知,弗兰克·阿萨罗是如何以十亿分之几高精度分析痕量元素铍从而获得了 KT 撞击的首例证据的。这里,让我们看看,占百分之几的主要元素为 KT 撞击坑的定位是如何提供证据的,虽然这证据曾在许多年内未得到正确理解。

地壳中的重要矿物,无论在大陆的地壳或海洋的地壳,都是由较多的带有负电荷的氧原子与各种各样大多较少的带有正电荷的原子(其中最为重要的是硅原子)构成的。主要由硅与氧构成的一类矿物用“硅酸盐”这一术语概括。最简单的硅酸盐是石英,石英分子由两个氧原子和一个硅原子构成,其化学式是 SiO_2 。¹⁷

大陆地壳中的岩石主要是石英与称做长石的另两种硅酸盐矿物,长石中含有铝(Al)、钠(Na)和钾(K)。海洋地壳中的矿物是其中钙(Ca)和镁(Mg)为重要元素的硅酸盐。海洋地壳中最突出的矿石是橄榄石、辉石与富钙长石。海洋矿物比大陆矿物密实,这可用海洋盆地与大陆间的高度差别来解释。现给出一个非常简单化了的摘要:

大陆地壳矿物及其化学组成:

石英	SiO_2
钾长石	KAlSi_3O_8
钠长石	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

海洋地壳矿物及其化学组成：

橄榄石	Mg_2SiO_4
辉石	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
钙长石	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

从以上摘要清楚地看到，大陆地壳以含 K 和 Na 为特征，而海洋地壳以含 Ca 和 Mg 为特征。

海洋撞击的证据

如果有谁能从撞击物击中地点的基岩上的靶岩石处找到一些实际岩屑，那么，由于陆地与海洋岩石化学组成的不同，就有可能确定出 KT 撞击地点是在大陆上还是海洋中，斯米特是发现靶岩石碎屑的第一人。他在研究从卡拉瓦卡采到的西班牙 KT 界线样品时，注意到有些特定成分的沙粒大小的白色圆形颗粒，他把这种颗粒称做小球体。这种小球体包含着撞击坑地点是处于陆地或海洋的线索，可是这样的线索极其费解，以至许多年过去了还无人能充分理解这种小球体，甚至直到现在它们还带有某种神秘。

斯米特采用了研究岩石和矿物时地质学家常用的方法，把小球体切割成两半，将它们黏在玻璃片上，把它们碾磨到薄得变成透明的程度。当他用显微镜观察这些小球体薄片时，看到其内部晶体结构是羽状的，这在矿粒中是极为罕见的形状。他在用电子微探针分析其化学结构时，发现这种羽状晶体是由矿物性的透长石——一种钾长石——构成的，这是在沉积岩石中找到的十分奇特的矿物。¹⁸

斯米特去了加利福尼亚大学洛杉矶分校，同凯特和沃森一块工作，还加入了由德保罗 (Don DePaolo) 领导的研究界面层同位素地球化学的一个研究组。第二次世界大战以来，同

位素研究¹⁹对地球科学所有方面已经提供了丰富的信息,德保罗成为这个科学领域中最具光辉成绩的年轻人之一。他因此而来到伯克利,并建立起第一流的同位素实验室。

德保罗小组的研究表明,怎样能把斯米特的西班牙的KT界线黏土分解成4种不同来源的组分:(1)撞击物;(2)靶岩石;(3)西班牙本地沉积物;和(4)后来的取代物。他们在一项出色的铈与钕的同位素分析中,指出黏土层中的靶岩石成分与来自大陆地壳的完全不同,而与海洋地壳中的极类似。从他们的研究看来,显然撞击曾是在海洋中。²⁰

采用氧同位素比率数据,他们还能指出,斯米特的小球体中的透长石并不是原生的,它既不是来自撞击物也不是出自靶岩石,而是后来生成的取代矿物。小球体的原初矿物曾是某些不同的矿物。原初矿物本身后来由一位新近献身于研究KT的科学家确认,他便是以桑德罗(Sandro)闻名的亚历山德罗·蒙塔纳里(Alessandro Montanari)。

我遇到桑德罗是在1978年的夏天,完全出于偶然,相遇的地点是在古比奥附近的亚平宁山脉的高山上,当时他正在乌尔比诺为完成他的学士学位而工作。在我们用午餐时眺望着岩石嶙峋的峡谷,谈论着有关亚平宁的地质情况,在小村庄上用过晚餐后,开始一块听音乐。桑德罗向伯克利提出申请,被接受做研究生。

桑德罗和我在意大利调查、探索并对许多处的KT界线取样,桑德罗发现这些样品中包含的小球体与斯米特所发现的非常相像。他在显微镜下观察、研究小球体时,发现更多的不寻常的晶体纹理,有的地方的小球体中有像雪花的枝杈形的纹理,另外地点的小球体中则带有辐射纤维形的星爆形状的纹理。我的同事伯克利教授迪克·海(Dick Hay)认识到,这些就是由以中等速率(既不缓慢冷却生成全晶体,也不快速冷

却生成玻璃)冷却下来的不寻常熔岩结晶成的橄榄石、辉石与富钙长石的纹理。迪克·海向我们展示了几篇论文,它们描述了从月球带回来的撞击小球体中的雪花形与辐射形纹理。于是,在桑德罗领导下,我们的研究小组推断,KT 小球体的原初矿物曾经是橄榄石、辉石与富钙长石。²¹这个观点数年后得到了支持,那时斯米特在太平洋底发现了一处 KT 地点,即沉积物中的钻孔,那里小球体中的羽状晶体未经改变,它们确实是由辉石构成的。

橄榄石、辉石与富钙长石!这些都是玄武岩的特有矿物,而玄武岩是海洋地壳的主要岩石。总之一切证据都互相吻合,而桑德罗研究小组确认了德保罗研究组的结论。我们只能给出这种小球体是撞击在海洋地壳上造成的结果的结论。

但我们全都在犯傻!我们是从化学的、矿物学的和同位素的证据中引出这个明显结论的。结果,当撞击坑确实在大陆上时,却投入大量精力去在海洋中寻找 KT 撞击坑。

大自然是如何愚弄我们的?仅仅过了数年,在终于找到了尤卡坦撞击坑后,我们确实理解了我们是怎样误入歧途的。尤卡坦半岛的深处具有大陆地壳,但它被厚厚的沉积岩层覆盖着,这层沉积岩层压在了缓慢下沉的大陆地壳的顶上。这沉积岩中的主要矿物是方解石、白云石和硬石膏,这些都是由碳(C)、硫(S)而不是由硅(Si)构成的矿物。现将我们的相关矿物表扩充如下:

沉积矿物及其化学组成:

方解石	CaCO_3
白云石	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
硬石膏	CaSO_4

大陆地壳矿物及其化学组成:

石英	SiO_2
钾长石	KAlSi_3O_8
钠长石	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

海洋地壳矿物及其化学组成:

橄榄石	Mg_2SiO_4
辉石	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
钙长石	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

终于弄清楚了为什么我们会导出错误的结论。大自然把富含钙与镁的沉积岩混入富含硅的在下面的大陆地壳中,对我们产生了误导。撞击能量熔化了这些完全不同岩石的混合物,碰巧形成了与海洋地壳相近的混合化学组成。这偶然混合的化学元素共同混入熔化的微滴中,这些微滴被喷射出大气层而进入外空。当这种微滴在大气外未回到地球前自由下落的冷却过程中,就结晶成橄榄石、辉石和富钙长石。这些是海洋地壳中特有的矿物,因而使我们误认为撞击靶是在海洋之中。

撞击地点已被地质演变抹掉了吗?

20 世纪 80 年代初,海洋中撞击的化学证据似乎在迫使我在海洋地壳上寻找巨大撞击坑上浪费掉大量精力。你会以为直径 150~200 千米的撞击坑在洋底容易找到。当然,对于像大西洋这样的经过很好研究过的大洋,已由数百条海洋测绘船的航迹纵横覆盖,本应该老早就发现它了,但已知大西洋中并无大撞击坑存在。我们懂得,彗星与小行星的较小规模的撞击所生成的全部撞击坑都在水中,在洋底不会留下痕迹,但是 KT 撞击物据估计直径达 10 千米,这是深洋底深度的两

倍那样大,我们确信它会在洋底造成巨大的撞击坑。

看来也许撞击遗迹留在海洋的遥远且少为人知的地方,像太平洋最南端接近南极洲的海洋中,海洋测绘船是很少到那里去的。即便是这样,在撞击坑附近的沉积应该有能觉察的沉积物存在,而那里充足的深海沉积物岩芯提供的证据表明,太平洋并不存在这样的沉积。化学提供的信息说明撞击是海洋上发生的,而沉积物岩芯的信息说明现存的任何海洋中都未曾发生过撞击。我们对这样的情况该如何解释?

幸而大自然早就为我们提供了没找到预料中的海洋撞击坑的一个现成的辩解理由。自从白垩纪—第三纪界线时代以来,那时所存在过的海洋地壳有五分之一已经俯冲入地幔了,它们已被全部吞入地球的深处。我们要找的撞击坑如果是处在那些已消失的地壳上,就早被全部毁掉了。撞击坑已被毁掉的 20% 可能性,为我们未找到它给予谅解,也使得我们放松,不再在搜寻撞击地点上付出应有的大力气。

我有时想到海洋撞击会产生巨大的海啸,应该在地质学文献中寻找 KT 界线时期沿太平洋周边巨大波浪沉积的痕迹,但是我什么也未找到。海啸沉积最后将会成为寻找撞击地点的关键,但是许多年都未找到,或许会在一处想不到的地方。

受冲击石英与在大陆上的撞击

我们刚因撞击发生在海洋的证据变得高兴时,好景却突然被力主陆地撞击而反对撞击发生在海洋上的矛盾线索搞乱了。皮尔莫尔在新墨西哥州的非海洋 KT 地点又增加了许多洛基山地区的非海洋 KT 地点,它们从新墨西哥州和科罗拉多州到怀俄明州和蒙大拿州一带,向北直到加拿大的萨斯喀

彻温和艾伯塔省。丹佛的美国地质调查局地质学家博霍尔 (Bruce Bohor) 领导的研究小组发现, 这些地点含有一种特有的石英颗粒, 它们曾以一种不寻常的方式遭到损坏, 在显微镜下能看到它们带有多组二维的形变带。²² 已知这类石英颗粒的损坏发生在靠近被证实的撞击坑的基岩中, 据认为这类损坏来自冲击波, 冲击波则是由于撞击通过周围的靶岩石而产生的。²³

博霍尔总结说, KT 界线中的石英颗粒曾被冲击过。这一论点有力地支持了撞击假说, 这是由于撞击是在岩石中产生冲击波的已知惟一机制。犹如地震期间地球地壳通常位移所产生的地震波, 在通过岩石堆时会使其压缩和扭曲。但就像弹簧似的, 地震波过去后岩石又恢复其原来形状。而冲击波却异常强烈, 它将永久性地压坏岩石, 使受冲击石英中留下像二维形变带这种损坏痕迹。博霍尔和他的地质调查局的同事伊泽特 (Glen Izett) 对受冲击石英做了详细研究, 用撞击冲击波对这种情况作解释很有说服力。²⁴

另外一些地质学家如卡特 (Neville Carter) 和奥菲瑟 (Charles Officer), 向博霍尔和伊泽特发起挑战, 争辩说石英颗粒中的毁坏条带在火山喷发中就能产生。他们展示了来自火山岩石的受损石英颗粒的照片,²⁵ 但是与来自 KT 界线及来源于已知多处撞击坑的石英颗粒中特定的二维形变带并不很一致。似乎可以合理地认为撞击应产生与火山爆发类型不同的损坏。火山喷发甚至并不是爆发, 是减压活动过程, 在岩石中不会产生冲击波。1988 年在第二次斯诺伯德讨论会上争论发展到顶点而成为最后摊牌, 当时深入仔细地察看了火山石英颗粒的显微图象, 鉴别其形变带是不是二维的, 是否产生多组, 像不像来源于撞击坑的受冲击石英。当激烈争论平静下来后, 多数与会者同意, 真正的受冲击石英能与火山岩石中的

石英确定无疑地区别开来,并认为真正受冲击石英是撞击的决定性的证据,但是从未形成过一致看法。

受冲击石英在对撞击假说给予起码是暂时的支持的情况下,却又引出一个严肃的问题。石英是大陆性的典型矿物,并不存在于海洋地壳中。如果撞击发生在海洋中,在那里怎么能出现受冲击石英呢?我能想出的惟一方式是,该处石英是分布于撞击地点海洋地壳顶层的深洋沉积物。我们有些人坚持寻找一处海洋撞击地点,但另一些地质学家发觉受冲击石英不得不被认为是大陆上撞击的证据。最后显得他们正确,但相互抵触的证据导致寻找撞击坑的事持续了若干年的混乱状态。

更多的疑点——印度与火山悬案

整个 20 世纪 80 年代,有关 KT 争论主要是两种绝然不同的观点间的论争,一种观点认为 KT 灭绝是撞击的结果,而另一种观点把它归结为大规模火山活动。双方地位的强弱或多或少是此消彼长的。我们主张撞击说的这个阵营的证据有,KT 界线地层中的铀元素异常、小球体与受冲击石英,支持彗星或小行星撞击的观点,但是我们不能找到撞击造成的巨大撞击坑。火山说的支持者们在 KT 界线黏土层中找不到支持 KT 时期巨大火山喷发的强有力的证据,但他们能指明在印度于大致正确的年代曾发生过一次称做“德干圈闭”的巨大的火山喷发。庞大的一堆玄武岩,覆盖了印度西部的大部分地方,其年代已知大致是 KT 界线时期。

在弗吉尼亚理工学院工作的杜威·麦克莱恩(Dewey Mclean)是第一个主张德干玄武岩与 KT 大灭绝之间存在关联的科学家。²⁶杜威提出,德干火山活动释放出极其大量的 CO_2 ,

导致温室效应而造成大灭绝。我的反对意见是,玄武岩爆发所造成的后果可能发生在至少百万年后,而大灭绝的发生是非常快的,况且“德干圈闭”的形成时代并不确实。不过杜威的观点是,大灭绝也不是突然出现的,灭绝过程持续了数十万年或数百万年。杜威与我对 KT 界线持完全相反的观点,我们的热烈争论使得几次科学聚会很有生气。

但是,正当 KT 界线撞击证据确立时,杜威关于“德干圈闭”发生年代的证据也被确认。法国科学界与政府中的重要人物库尔蒂约(Vincent Courtillot)开始实施一项精确测定德干玄武岩年代的科学计划。他得到的年代数据越多,越加趋近 KT 界线的年代。²⁷数年以前,库尔蒂约和我曾在加利福尼亚一块工作过,我们一直保持着友谊,可是在观点上他引用和强调一部分证据,我引用和强调另一部分证据。在会议上我们也曾有过激动的对峙。

然而,在达特茅斯工作的奥菲瑟孜孜不倦地担当火山说支持者们的旗手。他具有理论地震学家和工业地震学家的丰富经历,在 20 世纪 80 年代初他把全部注意力集中到 KT 奥秘上。他和达特茅斯的同事查尔斯·德拉克(Charles Drake)于 1983 年和 1985 年发表了两篇篇幅很长、论述详细的关于撞击假说的评论文章,探究了证据中每一处有可能存在的缺陷。²⁸奥菲瑟不只是不同意我的观点,而且也常常强烈反对其他推崇撞击说的几乎每个人的看法。他的意见迫使我们一再反复检验我们的主张是否真的像我们坚信的那样能立于不败之地。尽管 10 年未能找到撞击坑而备受挫折,但实际上这是一件幸事,因为撞击坑地点的早发现,可能会使奥菲瑟逼迫我们面对的每一点证据所受到的强烈质疑中断。

尤卡坦撞击坑的发现,使得 KT 大灭绝是德干火山活动的后果的争论再也难以继续下去。无论如何,急于得出在大

规模灭绝中火山活动不起作用的结论为时过早。我们将于第七章作出阐述。

“复仇女神”星——死亡之星

在这个时期,大自然又出了其他有趣的难题,使情况变得复杂。1984年,芝加哥大学的古生物学家劳普和塞普考斯基复查过化石记录后提出,灭绝以2600万年为周期有规则地出现,²⁹ KT界线仅仅是若干个已知大规模灭绝中的一次。劳普给我父亲寄了一篇有关论文的预印本,但父亲认为这个说法肯定是错误的。什么原因能造成大灭绝按时间表周期性地发生呢?他相当肯定,至少KT灭绝是由撞击造成的。什么事情能比大的小行星或彗星撞到地球上这样的事件更具偶然性呢?

父亲请求马勒查看一下劳普—塞普考斯基的论文,并说到自己持否定态度,但马勒对其资料做过严密的分析之后,变得越来越相信劳普和塞普考斯基确实找到了灭绝事件的周期性。父亲质问他撞击导致灭绝的事为何能以固定的时间间隔发生,马勒提出的想法是太阳很可能有一个遥远伴星,它每2600万年接近太阳一次,以某种方式激发出一阵撞击的风暴。围绕太阳运转的伴星与其他所有恒星都不同,其他恒星的运动都是与太阳无关的。

太阳伴星怎能激发一阵撞击风暴一直没搞清楚,直到马勒与天文学家戴维斯(Marc Davis)和胡特(Piet Hut)开始探索这个问题为止。尽管他们三人对这个问题感到困惑,但他们确信,虽然假设的伴星从未与太阳接近到对内太阳系的小行星产生干扰,但在它运行到最接近太阳时其引力摄动能使太阳系最外边缘处的彗星改变运行轨道,这将把这些彗星的一

些碎屑送到太阳附近,因而形成的彗星雨就会增加大到足以造成大规模灭绝的一次撞击的可能性。所作的全部计算都正确,他们在论文中提出了周期性大规模灭绝的这个机理。戴维斯、胡特和马勒建议把那个微小、朦胧又不显赫的太阳伴星用“复仇女神”(Nemesis)这个名字来命名,这颗伴星虽未发现却可能呆在远方。³⁰

我向马勒提到,如果确实是复仇女神星激发出周期性的彗星雨,则地球上撞击坑的年代应该显示相同的周期性。当我们仔细审视格里夫的撞击坑表中的年代时,似乎确实就是这样的情况。³¹还发表了有关灭绝周期性的其他可能的解释,³²围绕着统计性证据的确实性发生了激烈争论。这一段插曲的故事情节在马勒的专著《复仇女神星,死亡之星》中有完整的描述,该书以深邃的洞察力阐述了科学实际上是如何运作的。³³

马勒开始对“复仇女神”星进行系统的搜寻,这一计划与在干草堆中寻找一根针非常相像。他至今尚未找到,但也许有一天会找到。我设想将来的科学家们会回顾这一幕并感到好笑,但我预见不到笑话是否由于我们少数人因幻想虚幻伴星的怪诞故事而陷入了某种虚假的周期性迹象中,还是由于大多数科学家没有认真对待它,以致虽然足以改变我们对太阳系的整个认识的伴星呆在远处,但却从未找到这颗伴星。

仍有许多疑问 ——铀元素异常果真是撞击的标志吗?

即使 KT 撞击假说被详细描述为太阳伴星引发周期性灭绝的一个推论,但铀元素异常作为 KT 撞击的初始征兆仍然受到责难。在测量夏威夷基拉韦厄火山逃逸出的气体时显示

铱元素的存在,火山说的支持者似乎对铱异常证据有所维护。³⁴然而,很快就有相反的证据出现,表明火山气体中的铱元素与KT铱异常毫无关系。

铱是6个铂族元素中的一个成员,全部铂族元素都被熔融的铁吸附,因而集中到地核中,在地表实际上不存在。它们全都能由撞击地球的小行星和彗星输送到地球上。年轻的俄罗斯物理学家别科夫(George Bekov)是位于莫斯科的一个科学研究组的成员,该研究组发展了一项极有成效的分析技术,该技术称做激光光致电离技术,很适合作铂族元素测量工作。³⁵别科夫和弗兰克·阿萨罗一同测定了KT界线地层中铂族的三个元素,它们是铱、钌和铑。他们发现,KT界线发生异常的那些元素,其存在比率与陨星中的存在比率相同。火山喷发中的铂族元素其比率完全两样,这是因为它们在地球内进行的化学过程中的行为与之不同。于是,这一比率为他们提供了一个把铱异常紧紧连结在地外天体的撞击上,而不是与火山爆发有联系的线索。

当时,整个20世纪80年代一直有一个需要回答的烦人问题。许多科学家曾问及,地层学记录中KT铱异常是否显得不寻常。他们会问:“你怎么能知道在许多地层学层面上,由于类似于火山活动的地球上某种共同原因而不存在铱异常?”如下解释是毫无用处的:在伯克利或在能做中子活化分析的极少数其他实验室之一里完成的各个铱元素分析是耗时和昂贵的,贯通数百米对整个地层小间隔取样做出分析,来寻找全无把握其有无的铱异常,我们担负不起这种研究活动。

所以,我父亲打算发明一个既快又省却能做大量铱元素分析的方法。为此父亲艰苦工作了好几个月,他终于设计出一套进行中子活化分析的机器装置,通过该装置他能把若干个灵巧的分析手段联合起来做大规模生产式的铱元素分析。

1986年里,父亲的专用铀元素符合计数器已为测量做好准备。这时我们能做到系统地对整个地层记录获取数据资料,看看铀元素异常到底是普遍的还是罕见的。

要检查的明显的岩石序列是古比奥的斯卡尔亚罗萨石灰岩,该地发现了第一例KT铀异常,桑德罗做取样工作,搜集到数百个斯卡尔亚石灰岩小碎片,样品间隔非常靠近,因此不会有重要的铀异常隐藏在样品层之间。弗兰克·阿萨罗和海伦操作石灰岩通过符合计数器,测量了好几个月,当他们的工作完成时已经搞清楚,在那个时间间隔中根本没有其他铀异常可同“恐龙杀手”相比较。³⁶大撞击是少有的。父亲作为一个创新者,他的技能很可能使悬案得到了结。³⁷



图 12 桑德罗在亚平宁山脉坐在他的流动野外实验室中。

埋藏在曼森的撞击坑

在探寻 KT 撞击坑中还有另一个问题。我们并不确切清楚应当找出一个单一的巨大撞击坑还是可能有两个或更多的较小撞击坑。有多重撞击坑的可能性与彗星雨(随同复仇女神星而来或者不随同复仇女神星而来)的概念紧密相连,这是由于一次彗星雨可能在 KT 界线上产生在时间上紧紧相连的若干次撞击。1984 年我父亲组织了一次涉猎周期性大规模灭绝问题的人的聚会。会上马勒首先指出,一次彗星雨能在地球上产生多重撞击,持续大约百万年之久,并提到这种一连串的撞击能对克莱门斯和其他古生物学家由化石记录推测出的逐渐灭绝作出解释。³⁸

那个观点当然意味着,表面看来是逐渐灭绝,但实际是若干突发步骤在时间上紧紧相接的表现。科罗拉多大学的古生物学家考夫曼(Erle Kauffman)将工作引向确定是否如此,这是一个困难任务,在化石记录的分辨率达到极限时它就是那样,且对不同的大规模灭绝或许是不相同的。

这还意味着,撞击坑的年代应当在时间上紧密串连在一起,且撞击喷射物的堆积层在地层学记录中应当成群集拢。这一研究工作成了尤金·苏梅克和桑德罗的特殊兴趣。他们和各方面的同事们共同完成的工作相当清楚地揭示出,大约 3 400 万年前接近始新世—渐新世界线时,存在有过一连串撞击的一段时间,此期间灭绝增大但并非灾难性的。³⁹

彗星雨概念与多重撞击也对有争论的下述老问题给出一个合理答案,该问题是 KT 小球体表明撞击发生在海洋,而受冲击石英却支持撞击发生在大陆。也有可能发生过两次撞

击，一次是海洋上的，而另一次是大陆上的。美国西部的 KT 界线确实存在两层，下面一层包含着小球体，而上面一层则含有受冲击石英。两层相接但界线分明。⁴⁰看来真像是由两个分开的撞击造成的。特别是旁边有一个撞击坑，看起来像是上层受冲击石英的来源。

在艾奥瓦州中部靠近曼森城的地方，在农田的冰川漂砾下面，北美洲的大陆地壳刻有一次巨大撞击的疤痕。曼森撞击坑的直径达 35 千米，其大小尚不足以造成大规模灭绝。因为这样大的撞击坑还有许多，未见导致大规模灭绝，但是仍然具有实质性重大意义。⁴¹初步年代测定表明，曼森地层与 KT 界线的形成年代大致相同，并且其基岩富含石英。似乎大自然的骗术终于被揭穿了。原来存在着两次 KT 撞击。大陆上的撞击发生在曼森，海洋上的撞击很可能发生在海洋地壳上，因其早已俯冲入地幔将永远不再能找到。终于理解了大自然的花招使人们欣喜，但这样的满意为时过早。大自然打算给我们另一次嘲笑。

尤金·苏梅克、罗迪 (David Roddy)、安德森 (Ray Anderson) 和哈通 (Jack Hartung)，在曼森组织了一个钻探计划，他们回收到引人注目的富含受冲击石英的撞击致碎岩石⁴²。当受冲击岩石生成的年代被测定后，他们认定其年龄为 7 400 万岁，确定无疑地比 6 500 万年前的 KT 界线还要古老。这一新年代提醒人们在岩石记录里往哪里寻找岩屑，果然，在南达科他州伊泽特找到了来自曼森的喷射物，恰好是在 KT 界线的下方。⁴³

所以曼森曾经恰好是 KT 奥秘中的另一条“熏鲱鱼”(混淆视听的线索)。但到那时曼森已从受到怀疑的名单中除掉，最后我们走上正确的行程。

父亲从未找到有关地点。他在 1988 年就逝世了。在地

球史上最令人激动和兴奋的某些研究中,他曾成为核心人物有10年之久。他曾为克服大自然设置在寻找撞击地点的过程中一切骗局与绊脚石所作的努力而开心。父亲原本会赞赏为地球带来厄运的撞击坑的发现。

第六章

致使恐龙灭绝的撞击坑

20 世纪 80 年代的 10 年中,所发现的支持 KT 灭绝撞击理论的证据越来越多,但是撞击地点一直未找到。

在优秀的侦探小说中,罪行隐藏得几乎甚为完美,通常有一条“熏鲱鱼”(迷惑视听的线索)在侦破过程中捣乱。在我们进行的探寻工作中,这“熏鲱鱼”就是误导的证据,前一章所叙述过的表明海洋中发生撞击的证据就属于这类线索。然而,在优秀的侦探小说中,还有一个微小的破绽藏在隐蔽处。最后侦探找到此破绽后,其余一切假象都会廓清,罪犯终于暴露出来。寻找 KT 撞击坑所走过的进程同这个侦破过程极相似。其中假象几近完美逼真,而其中的破绽出在海啸上。

发生在海洋上的巨大撞击必然出现真正强暴无比的海啸,足以侵蚀其他任何波浪从未到达过的深海洋底。当海啸抵达大陆边缘时,将会激起或许高达一千米的高耸波浪,在岸边近旁崩塌下来。岸边森林将被摧毁,岸边的砂砾将被震撼卷携到深水之中,成为巨大的流动性水下滑坡,地质学家称之为浊流。浊流的沉积砂层叫做浊流岩。如果我们在海洋边缘处找到浊流岩恰好是在 KT 界线处的海洋沉积物裸露层,它会标志着那处海洋存在着撞击地点。

但我们目前已知,撞击并不发生在海洋之中。撞击地点在尤卡坦的大陆地壳上,在海平面以上或只稍低于海平面的地方,那里本不应发生过巨大的深水海啸。如果隐蔽曾是十分完善的话,哪里本来都不会有海啸造成的沉积物,我们即便

是无休止地寻找下去,最终也是枉然。

不管怎样,在隐蔽之中存在着一个小小的破绽。撞击发生在大陆却紧靠海洋。总之近到足以在毗邻的海洋产生海啸,海啸或许是由来自撞击坑的岩屑落入附近深海引发,或许是由撞击激起的地震波或水下滑坡引发。准确的机制至今尚未阐明清楚,但是这一点是千真万确的,彗星撞击尤卡坦半岛后,海啸立即从撞击地点急速传开。它把自己迁移的证据以覆盖着沉积岩屑的撕裂的海底形式遗留下来,这就是我们正在寻找的证据。我们被愚弄了好些年,但是我们将要偶然发现近于完美无缺的隐蔽之中的破绽。

海地和得克萨斯

莫拉斯(Florentin Maurrasse)是一位在佛罗里达国际大学工作的美籍海地裔地质学家,自从20世纪70年代起我们就成为朋友,当时我俩都是哥伦比亚大学的拉蒙特—道尔蒂地质观测台的研究员。很多年前,莫拉斯在海地的南部半岛上的贝洛克城附近发现了一处深海KT界线地址。那里是贝洛克露头中一处恰在KT界线上的粗糙沙质岩层,不幸的是莫拉斯的发现时间在大家关心KT界线之前,同时也是在无人知道所提出的关键性问题之前。1980年,他曾就贝洛克发表过一篇论文,¹正是发表铀元素最初发现的论文的同一年,当时他得知我们的有关工作,发送了一批样品到伯克利。弗兰克·阿萨罗和海伦找到其中的铀异常,于是贝洛克被列入早期确证的地点之一。²但这事发生得太早了,还在我们确信应当寻找浊流岩以前。当时,贝洛克的KT界线的沙质岩层并不特别被看中。随着继续不断地找到更多KT地点,贝洛克只是在不断增长的名单中另一个深海KT铀元素地点而已。那

儿地处遥远,很少有地质学家去过那里,没人相信贝洛克会具有海啸的证据。充分的研究线索应当从另外的地方探寻。

布拉索斯河是流经得克萨斯州南部的许多条河流之一,河水注入到墨西哥湾。沿岸平原的沉积物缓缓向南倾斜,所以布拉索斯河在流入海湾途中穿过地层中越来越年轻的岩层。在这些松软的沉积物中岩层露头并不多,但在韦考与学院站之间该河流跌落越过几个由坚硬沙质岩层形成的低洼滩。20世纪80年代早期,这个区域引起了在得克萨斯大学工作的古生物学家汉森(Thor Hansen)的注意。他所进行的详细的化石收集显示出该沙质岩层恰好处在KT界线上,他还认识到该沉积层与其上方和下方的细颗粒海洋沉积物不同。³本奇(Ted Bunch)和马多克斯(Rosalie Maddocks)把样品送交给弗兰克·阿萨罗和海伦,他俩在其中发现了预期的铀元素异常。这事恰好与在贝洛克的遭遇相同,由于为时过早而未能正确评价该沙质岩层的重要意义。

我认为觉察到布拉索斯沙质岩层潜在重要性的第一人是扬·斯米特。斯米特比其他任何人都更多研究全世界的KT界线情况,当他在20世纪80年代初,首次来到布拉索斯河时,就觉察到该地沙质岩层有些不寻常。在一篇于1985年同罗梅恩(Ton Romein)共同发表的论文中,⁴斯米特对布拉索斯岩层露头含有这样的评论:“这或许就是撞击(海啸?)激起的沉积物的第一个证据。”

即使由于海啸波对沿海全体居民的威胁,对它们进行了认真的研究,但我们几乎对它们的沉积情况一无所知,假如从有关地层记录中有所了解的话,也属很少。甚至像斯米特那样有经验的沉积学家也不会知道巨大海啸形成的沉积物是什么特征。最后,布拉索斯岩层引起了在华盛顿大学工作的沉积学家布儒瓦(Jody Bourgeois)的注意。当莫拉斯和我在哥伦

比亚大学时,布儒瓦曾是那里的大学生,她对巨大暴风雨造成的沉积特别感兴趣。或许她比其他任何沉积学家都清楚对有关海啸沉积的了解多么少的情况。布儒瓦聚集了一个工作队详细研究布拉索斯的场地,根据他们的研究工作明确地指出,唯有一场真正的巨大海啸才能说明布拉索斯沙质岩层的错综复杂的特征。⁵

说到我们认清布拉索斯河和贝洛克沙质岩层的重要性有多么缓慢真是令人啼笑皆非。回想起来,莫拉斯、汉森或斯米特,或者我们这些在伯克利掌握着铍分析样品的任何人,原本能比实际情况早几年就搞清楚撞击地点在墨西哥湾——加勒比海地区。但是我们没能做到,这是因为真实的线索淹没在了数百位科学家发表的大量数据资料之中。截止到20世纪80年代末,我们已经知道具有铍元素和其他各类有趣证据的KT地点达100多处,直到布儒瓦和她的同事们指出布拉索斯河恰好在KT界线处包含着海啸沉积物之后,布拉索斯河才处于特别重要的地位。

在那个关键时刻,最需要人们把注意力完全集中到寻找布拉索斯海啸的来源上,相信布拉索斯沙质岩层是基本线索的人应当紧追它而不能止步,直到抓住确证。这正是我本应作的事情,但我却对像印度的德干火山熔岩的大量泻出和艾奥瓦州的曼森撞击坑等著名候选地点更感兴趣。我总是猜疑KT撞击地点实际上是在早已俯冲入地幔的海洋地壳之上。正是艾伦·希尔德布兰德(Alan Hildebrand)成为那个不屈不挠的侦探人员。

艾伦·希尔德布兰德对撞击坑的探寻

艾伦是20世纪80年代初来美国亚利桑那大学跟博因顿

(Bill Boynton)作研究的一位加拿大人。对一个新研究生来说,决定性的任务是选择一个做博士学位论文的课题,决定的课题既要具有充分的重要性和挑战性,又要不至于难到做不出来。艾伦从研究生学业一开始就集中在KT界线的研究方面,凭着对问题的关键的直觉,他首先注视到撞击导致火山活动的可能性上,随之发现了更多一些就海洋上撞击看来属于误导的证据。⁶

到了1988年,艾伦已断定布拉索斯河海啸岩层是寻找撞击坑的关键所在。他认为,因为得克萨斯州南方在6500万年前就同现在一样是朝向深海的方向,所以海啸只能来自得克萨斯州南方。他还推论到,由于墨西哥湾是一块封闭海区,阻止了任何来自远方的海啸,因而撞击地点不会距离得克萨斯州太远。艾伦接受了撞击发生在海洋地壳上的流行观点,把注意的焦点集中在墨西哥湾与加勒比海。

在顽强的探寻中,艾伦一再返回到布拉索斯河,竭力试图从海啸沉积物中找出每一条隐藏的线索和每一个点滴证据,为了找到可能是撞击岩屑的任何痕迹和可能是撞击坑的任何巨大环形构造,他查遍了有关墨西哥湾与加勒比海的地图与出版物。他在哥伦比亚北部加勒比海底地图上找到一批模糊圆形特征的地形,并且了解到在尤卡坦半岛的北海岸有一环形的重力异常图形。尤卡坦候选地点即使地处大陆地壳,看来确实也很有希望。

在1990年的会议上,艾伦报告了自己正进行的工作,他开始唤起了其他人对墨西哥湾与加勒比海的兴趣。由于某种原因,我对听说的有关布拉索斯河的情况从未产生特别深刻的印象。但1990年初的一天,我对寻找海啸证据的方法产生了一个新想法,就是不通过找海啸的沉积岩层,而是通过寻找由于海啸侵蚀在沉积记录中形成的间隙作为海啸的证据。我

的理由是,在海洋中发生撞击后,将会激起海啸冲击整个周围的海岸线,使大陆边缘的沉积物遭受侵蚀。海啸平静以后,沉积过程便重新恢复,结果会出现不整合——在沉积记录中出现间隙:白垩纪沉积层上部消失,而第三纪沉积层的基部保留下来。即使是撞击地点曾在早已消失的海洋地壳上,周围大陆边缘的海啸侵蚀证据照样能揭示出撞击坑的位置。



图 13 克拉伊斯(左)和希尔德布兰德正坐在得克萨斯州布拉索斯河谷边的 KT 界线岩层露头上。在该处确认到首例海啸沉积物。

我曾仔细查看过数百例海洋钻探计划所取得的沉积层岩芯记录,全世界只发现一处记录中具有这种间隙,地点就在墨西哥湾。我尽快地到设立在拉蒙特—道尔蒂的岩芯档案馆研究和抽样检验由 77 号钻探架位取得的墨西哥湾岩芯。那里的白垩纪沉积层的上半部已失去,紧接着这间隙之上是一层奇异的沙层,其中的微波形痕迹表明,在这个通常是平静的深

海环境中曾有过强大水流,沙层中还富含类似变质玻璃的黏土微粒。这沙层会是被撞击后海啸搅动沉积下来的撞击熔融玻璃颗粒的沉积物吗?我突然开始非常严肃认真地对待希尔德布兰德的观点。

关于在尤卡坦发现的环形重力异常图案,几乎找不到任何已公布的文献资料,而这种特殊现象暗示着埋藏地下的一个撞击坑。为了知道它们,艾伦必须做真正的侦察工作。最后,他查到了解尤卡坦构造的人们,因此他是第一个造访卡马戈(Antonio Camargo)和彭菲尔德(Glen Penfield)的KT研究者。1991年,终于发表了一篇由希尔德布兰德、彭菲尔德、克林(David Kring)、皮尔金顿(Mark Pilkington)、卡马戈、雅各布森(Stein Jacobsen)和博因顿撰写的论文,标题是《奇克苏鲁布撞击坑:位于墨西哥尤卡坦半岛上可能发生在白垩纪/第三纪界线的一个撞击坑》。⁷

确实是一桩爆炸性事件。决定命运的撞击坑终于找到了!纵使撞击发生在大陆地壳上,线索却是海啸。大自然把撞击坑隐蔽起来,地面上完全不露痕迹,但是却由海啸将附近发生的撞击证据传播到得克萨斯的一处岩层露头。汉森的化石年代,斯米特的预感,布儒瓦的详尽钻研,以及希尔德布兰德不屈不挠的探寻,终于结出硕果。我们学着拼读“Chicxulub”,发现它是一个玛雅字,发音是“Cheek - shoe - lube”(奇克一苏一鲁布),并开始听到一个彭菲尔德和卡马戈10年前就已经知道的惊人故事情节。

卡马戈和彭菲尔德

在电影《马德雷山的宝库》的开场中,博加特(Humphrey Bogart)是大萧条时期的一个美国石油工人,在位于墨西哥海

岸的墨西哥油都坦皮科市的油田上工作。1938年,即影片描述的时间开始不久,开发石油的外国公司就被墨西哥总统卡德纳斯(Lázaro Cárdenas)驱逐出境。独立的墨西哥自豪地决定独自进行开发,墨西哥石油公司(PEMEX)发展成一个大型国家石油公司。墨西哥国外的地质学家在50年之久的时间里很少知道那里发现了什么。

墨西哥的地质学家和地球物理学家对自己国家的石油进行探查,发现一些巨大油田。其中一处并不成功的探查地点就在尤卡坦平坦的北部沿海平原上,尽管该地点初探时颇有希望。在这种平淡无奇的地形上,寻找石油的第一步是进行重力普查,将重力的微小变化绘制成图。重力变化反映着地层深处岩石密度的变化,而这种岩石密度的变化又可能揭示埋藏着的含油构造。在对尤卡坦的初始重力普查中⁸,人们发现在梅里达附近的北海岸上,地面下埋藏着一个其中心在奇克苏鲁布港的极其巨大的环形构造。

我想像 PEMEX 的地质学家们一定为这个具有巨大重要性的地形蕴含石油的可能性而极其振奋。可是,当他们于1952年对该构造进行钻探时,乐观谅必已变成失望。在钻到约一千米深处的第三纪沉积物后,钻机开始提取到坚硬密实的结晶的岩石,这是一种与含石油的多孔沉积岩完全不同的岩层,化学分析表明,这是一种组成类似于安山岩的普通火成岩,大多分布在北美西部,由它形成的火山俯视着墨西哥城。PEMEX 的地质学家宣称,他们发现了一座被埋藏的火山。人们没有在火山中找到石油蕴藏,钻过若干不出油的钻孔之后,尤卡坦计划便宣告结束。我们现在知道,它并不是一个火山,但不能批评 PEMEX 的地质学家们的失误。因为在50年代,世界上能认识到这种结晶岩并非火山形成的安山岩,而是撞击造成的熔融岩的人大概不会超过六人。

不管怎样,是 PEMEX 的科学家们比所有其他人更早地做出了正确解释。卡马戈是于 1940 年在奇克苏鲁布“环形地区”内出生的一位地球物理学家,彭菲尔德是在 PEMEX 充任顾问的一位美国地球物理学家,在 20 世纪 70 年代,他们两人承担了在尤卡坦北部重新进行详细研究的任务。奇克苏鲁布的构造除了安山岩之外,没有一个火山的特征,在尝试对其所有的奇异特点作出解释时,他们开始怀疑它是不是一处撞击坑。他们研究了能找到的全部有关撞击构造的出版物,发现除了奇克苏鲁布比地球上其他已知的所有撞击坑都大得多之外,一切都同撞击坑没有差异。

搞学术研究的地质学家期望把他们的研究结果公布在科学文献上,但为石油公司工作的地质学家对探测结果很少发表,这是因为他们所处理的大量信息资料往往须保密。彭菲尔德和卡马戈仅仅在 1981 年作过一次简短发言,和在会议要目中附了一个摘要。⁹何其具有讽刺味啊!上一年我们曾发表过巨大 KT 撞击的证据,但是把两者结合起来竟耽搁了 10 年之久。

回顾往事,我觉得拖延了很久才把奇克苏鲁布与 KT 界线联系起来是件好事。在确认撞击坑以前的 10 年时间里,对该问题进行了数百次的认真研究审查。如果撞击坑发现过早,当时使它成为一个并无迫切重要性的问题,结果就不会对有关 KT 界线事件了解这样详尽。然而,在我们的搜寻工作渺无结果的那些年月里,一项关于奇克苏鲁布的顶刮刮的研究成果埋藏在 PEMEX 的档案中。直到最后,在希尔德布兰德提出尤卡坦撞击坑并引起研究 KT 界线科学家的注意之后,卡马戈和彭菲尔德终于开始谈到了他们的工作。很久之后,于 1994 年在休斯敦召开的第三次斯诺伯德学术会议上,卡马戈全部公布了他们的研究结果,以其高超的分析和详尽的细

节使听众叹服,并因此在 13 年前他和彭菲尔德已理解了 KT 撞击坑。

位于明布拉尔河的海啸岩层

对奇克苏鲁布撞击坑的认可改变了 KT 研究的方向。我们许多人需要对撞击熔融岩石进行分析,但撞击坑深埋在地下,不易抵达和取不到样品。于是从 PEMEX 旧油井中提取到的岩芯顿时成为急需的样品。不幸接到灾难性的报告说,在一次仓库失火中全部岩芯已遭破坏。彭菲尔德想或许仍有一些遗留下来的岩芯至今躺在尤卡坦的旧油井处。后来我曾看到过一些很好笑的记录片头尾,看到彭菲尔德正在一堆猪粪中掘进,据老乡说 30 年前那里曾放过钻探设备。令人遗憾的是,他没能在猪粪下找到岩芯。我曾对马勒说:“地质学的研究并不像物理学的研究那样优雅。”

在能预见到的未来时日,还探测不到深埋于地下的撞击坑。这期间我们能做些什么呢?碰巧 1990 年 12 月起,斯米特可以在伯克利逗留几个月,恰好奇克苏鲁布的事务理出了头绪。斯米特、桑德罗和我向我们自己提出一个问题:在检验奇克苏鲁布到底是不是 KT 撞击地点的问题上,利用很有限的一点经费,我们能做些什么?最关键的问题是撞击坑的发生年代。它与 KT 界线的产生年代完全一致吗?如果它更古老或更年轻,不是同灭绝无关吗?这确属一次决定性的检验。

撞击坑埋藏在无法接近的地方,所以我们决定探究最接近奇克苏鲁布的场所。那里的地表处很可能有 KT 年代的沉积物露头,像我们这些野外地质学家就能发现它们。看来最佳选择应在墨西哥东北部,这里白垩纪晚期和第三纪早期沉积到墨西哥湾海底的沉积物后来被隆起,于是暴露在一片半

干旱的沙漠上。很难找到有关该地区地质情况的已出版的论文或资料。无疑 PEMEX 的地质学家们对该地区非常了解,可是他们的研究结果肯定都藏在公司报告中,而不会在公开发表的国际学术文献里。我们曾在伯克利的地球科学图书馆中严密查找,结果令人失望。我们能找到的唯一材料是一本由美国地质学家约翰·M·缪尔(John. M. Muir)写的书,他并不是第三章提到的那位著名的博物学家。该书涉及的内容从1936年起,回到博加特的那个时代,即墨西哥石油工业国有化以前的时期¹⁰。诚然,并不像现代科学常发生的那样,50年前的一本旧书会成为发现的钥匙。可是,我们被缪尔描述的一处地点迷住了,令人觉得那里像是一处 KT 界线上的沙质岩层,位置在维多利亚城附近。我们决定去那里并在墨西哥的整个这一地区寻找 KT 界线的岩石露头,在我们安排旅程计划时,得到朗戈里亚(José Longoria)和甘佩尔(Marta Gamper)很多指点和帮助。他们是一对夫妻组成的古生物学家研究组,他俩对墨西哥东北部的微化石进行过长期研究,对该地区非常熟悉。¹¹

1991年2月,斯米特、桑德罗和我出发同米莉以及名叫斯温伯恩(Nicola Swinburne)的英国博士后研究人员一道,去墨西哥的东北部寻找 KT 界线的岩层露头。在通过使人难忘的山脉与沙漠的一些日子,我们的寻找工作空无收获,在那里对比利亚(Pancho Villa)*和墨西哥革命的回忆仍在迷人的斗牛士歌声中传诵着。在候选地址上的查验没能证实 KT 界线的存在,又向南走进行查验,越来越没信心。数年以前,在对墨西哥该地区的几次各自的旅程中,斯米特和我曾看到过几个样子相当普通的 KT 界线地址,使人没联想到海啸沉积物。

* 比利亚(1878~1923),墨西哥革命时期北方农民运动领袖。——译者

这次根本什么也没有找到。如果距奇克苏鲁布只有几百千米远的这里 KT 界线地点都平安无事未经干扰,奇克苏鲁布就不会是 KT 撞击地点,我们将空手而归。

缪尔去过的地点是我们候选地址名单上最南方的一处,汽车遭遇的困难和麻烦几乎根本让我们抵达不了这个目的地。最后一天下午我们才到达那里,它高高地位于被称做明布拉尔河的干涸河床之上。在一块泥岩的基岩向上戳穿砂砾层的地方,斯米特用他的手持放大镜观察一块块样品并说出有孔虫化石的年代,他说,越来越接近着第三纪地层的底部。吉普车颠簸难行,岩层逐渐向下倾斜,所以边向下行进边对地层的探查也十分缓慢,当太阳开始沉入地平线的时候,我们渐渐接近了 KT 界线。

最后河岸由矮堤耸成一垛高峭壁,它是在好几千米长的河岸上所看到的裸露着的最巨大岩石。我们以无比兴奋的心情冲上前去,来到我从事 30 年地质勘查研究从未见过的最迷人的岩层露头跟前。我们攀上岩石,伴随着太阳落山欢呼着一个接一个新的发现。“瞧,这条把这含石油沙层分层的水流!”“嗨,此处河床充满小球体!”“在这些深海沉积物中怎么会有那么多木化石呢?”直到再也看不清任何东西,我们才不情愿地开始返回。明布拉尔河使我们对一条著名的地质学工作规律更加坚信,野外工作季节中最佳岩层露头的发现往往是在最后一天,在最远的候选地址上,恰好在天渐黑起来时。

回到维多利亚城后,我们进行了一番争论。我同自己的良心作了一番斗争,而造成现在看起来似乎是为责任干扰重大科学机遇的错误。米莉、斯温伯恩和我决定返回伯克利,但是,斯米特和桑德罗改变了他们的计划,他们购买了大砍刀和煮饭锅,去了明布拉尔河的宿营地。接下来的整整一个星期

里,他们对那里的岩层露头进行了研究、测量、绘图、取样和拍照,事情进入问题的中心。

在白垩纪晚期和第三纪早期,该考察地址曾是明布拉尔河流向墨西哥湾的出路所在。在那里这样的深水条件下不会有能运送沙子的水流存在。只有泥灰岩(一种细粒黏土与碳酸钙的混合物)才能在这种环境下沉积下来。细细的黏土颗粒在海洋中会漂流一段很长距离,在那里它同碳酸钙质的微化石(由有孔虫死后遗留在海底的壳形成)混合在一起。有孔虫使证认 KT 界线准确的高度成为可能,它显示 KT 界线岩层的厚度为大多数其他 KT 界线地点的 100 倍。在相应于界线的时刻,平静的沉积过程被 3 米厚的沙层移入活动打断,平静的海底世界闯入了外来的沉积物。斯米特和桑德罗发现在沙层中有三层不同的单元,或者称做次层,在三个次层之间未见有任何显著的时间过程的征兆。他们仅能指出的是,全部三个次层可能是几天之内沉积而成。下面几点就是他们对各个次层的描述与解释:

(1) 首先,在底层上是一米厚的由海床剥离的局部深海沉积物,并且和撞击产生的小球体以及我们现在怀疑是尤卡坦台地的喷射碎屑的石灰岩碎石混合在一起。这第一层单元反映出海啸的活动进程,它从撞击地点出发扫过海洋,剧烈地摧毁宁静的海底,同时来自奇克苏鲁布的固体的和液体的喷射物经过大气层暴雨般地降落下来。

(2) 海啸沉积层上方,是一层两米厚的混合沙层,它具有与其下方沉积物完全不同的来源。沙来自当时的墨西哥海岸线,当海啸冲击海岸时被猛烈地摇松同时混入海水而变得流质化。含水沙流扫过陡峭的陆地边缘成为迅急的海底浊流,最后失去能量并沉淀下来在平坦海底变成浊流岩层。从沙质岩层包含粘结着木化石的地层来看,可作为它来自海岸上的

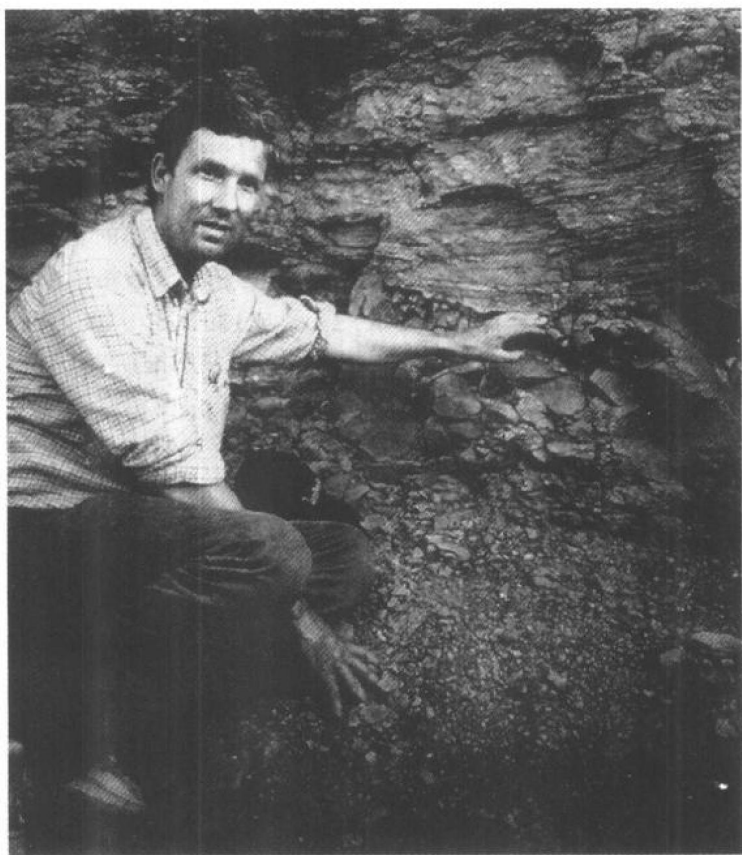


图 14 斯米特在墨西哥东北部明布拉尔河岸上,指着 KT 界线岩层露头的基底。这里曾是撞击产生的碎屑刚刚降落以后,海啸波浪冲刷过的墨西哥湾海底。

证据,显然木化石是闯入深海沉积层的外来物,揭示了强大的海啸波浪对墨西哥沿岸森林的摧毁。

(3) 最后,顶层是波纹状沙和细黏土交替的地层,它或许表明称做湖震的巨大波浪数次冲刷的过程。湖震是在封闭的

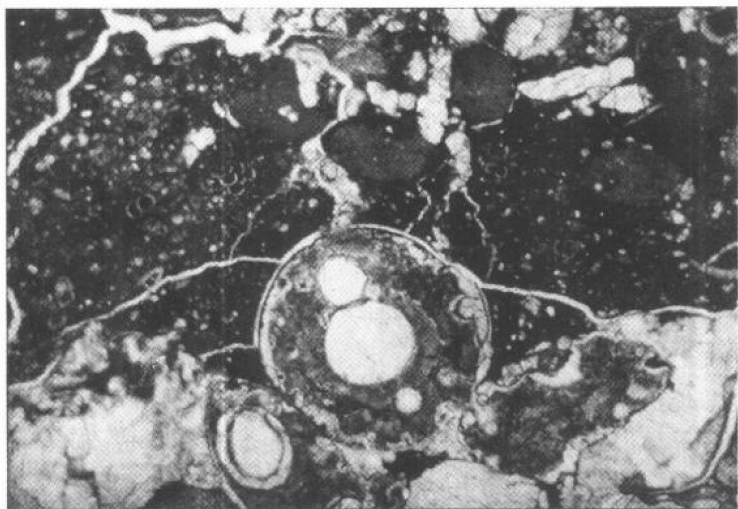


图 15 这是一张明布拉尔河床 KT 岩层中最下层面的显微照片,其中包括一个含气泡的直径约 1 毫米的圆形小球体。这种小球体源于撞击熔融,并转变成黏土。该小球体曾被推进海底泥浆中,可以看到泥中所含的有孔虫壳。更小的带棱角的灰色物体是石灰石碎屑,它们或许是从尤卡坦撞击地点溅过来的。

墨西哥湾中来回搅动的海啸减弱后断续的余波。恰好在这湖震沉积的顶层,弗兰克·阿萨罗发现了铱元素异常。这种铱必定出现在来自于气化撞击物的细小粒子中,这些细小粒子直到海水再度完全平静后才沉淀出来。

在这层复杂而饱含信息的 KT 界线岩层上方,平静海水中的泥灰岩沉积重新恢复,除了曾在海洋表层繁衍的各类有孔虫那时大多数都已灭绝外,好像未曾发生过什么事似的。很难设想对 KT 界线的大撞击有更清楚的证明材料。来自奇克苏鲁布的喷射物恰好在大规模灭绝时的地层面处全都混入海啸沉积物中了。

玻 璃！

桑德罗和斯米特带着大量的样品返回了伯克利，样品里包括其中富含着被毁海岸林木化石的巨大沙石板。不管是明布拉尔河的搜集物，还是我从 77 号钻井架位取得的岩芯中的样品，我们都有很多材料去研究。最重要的一件事是搜寻玻璃。当岩石被熔融后，无论由似火的地热缓慢熔融，还是由撞击突然熔融，冷却都是急速的，没有足够的结晶时间。其结果是只能产生原子排列无序的玻璃，而不可能形成原子规则排列的晶体。玻璃会保留下来熔融时的原始化学组成，但因其不稳定，极易转变为黏土，所以很难找到如地质年代那样古老的玻璃。

多年来人们都在寻找 KT 小球体中撞击的玻璃物质，但只发现过蚀变产物，其原来的化学性质已被破坏。不过寻找玻璃的希望与活动一直在继续，到了 1990 年末和 1991 年初，终于如愿以偿。有 4 个研究组分别都从莫拉斯在海地所考察过的贝洛克探查地点找到的小球体中发现了玻璃。¹²西于尔兹松(Haraldur Sigurdsson)是一位在罗德岛大学工作并有着广博火山玻璃知识的冰岛火山学家；美国地质调查局的伊泽特曾对 KT 撞击生成的石英有过深入研究；来自达特茅斯的莱昂斯(John Lyons)和奥菲瑟从反对撞击论的观点研究过贝洛克地点。他们中的每个人，还有莫拉斯，都差不多同时在贝洛克的小球体中找到了玻璃。除了达特茅斯研究组外，其他人都把这种小球体解释为微玻璃陨石，即喷射到大气以外空间再回落到地球上的由撞击产生的熔融玻璃微滴。¹³

当把贝洛克的微玻璃陨石的化学组成与同位素成分测定出来后，使得大家非常激动，因为它将成为直接反映撞击靶岩

石组成的证据。就当时所知情况,在奇克苏鲁布从墨西哥钻井中掘出的熔融岩石样品在 PEMEX 仓库大火后没有搜寻到,所以贝洛克的玻璃将是解答那里到底发生什么事件的唯一线索。

第一批成果中的某些结果来自西于尔兹松与一个法国地球化学家研究组的分析工作,¹⁴他们发现这种玻璃陨石大多由黑色玻璃构成,其化学组成表明它来自形成尤卡坦底层的大陆地壳岩石。在黑色玻璃内带有富含钙质的黄色玻璃条纹,它们的钙来自于富含钙质的沉积物的撞击熔融,富含钙质的沉积物包括石灰石、白云石和硬石膏,它们曾沉积在底层顶上成为厚厚的地层。

我们终于能够想通了,为什么我们在歧路上走了那样久。这是一个惊人的巧合。大自然曾提供了一个混合型的撞击靶岩石,由大陆地壳与大陆型沉积物混合构成,两者联合提供出辉石和钙长石——海洋地壳的基本矿物——的化学组成。造成混乱几乎 10 年之久的错误解释,终于得到澄清。

西于尔兹松的研究工作所提供的第二个重要含义出于这样一件简单事实:玻璃里的彩色条纹,表明它在熔融状态下没有足够长的时间变得均匀。这是一条支持撞击事件的特有的最有力证据,因为撞击产生的熔融物凝固得很快,而火山造成的熔融物会长时间停留在液体状态,因此几乎总是均匀的。

我们在伯克利的研究组没有令人激动的贝洛克玻璃供我们研究,但是我们有从明布拉尔找到的新材料。我们的样品也充满着小球体,可是检查过的每一块样品都已变质。我们特别注意到大多数小球体中都有微小的气泡,尽管已蚀变,但仍能看到,我们设想它们的出现,是由于位于奇克苏鲁布的撞击靶岩表层受到撞击时,其中的石灰石和白云石里所含有的二氧化碳气体释放出来所致。

但我们完全没见到玻璃。可能其他人会有好运气。所以我们把样品送到艾伦·希尔德布兰德那里,他必定会获得优先研究明布拉尔小球体的权利,因为明布拉尔是已知的距奇克苏鲁布撞击坑最近的岩层露头。

就在那时,我们开始认识了在加利福尼亚大学戴维斯分校工作的地质学教授斯坦·马戈利斯(Stan Margolis)和他的妻子、技师卡伦(Karen)以及他的比利时研究生菲利普·克拉伊(Philippe Claeys)。在证认和分析微玻璃陨石方面斯坦有着广泛的经验。从研究凯特在太平洋发现的一次不久前发生的撞击开始,¹⁵斯坦就一直同菲利普在做微玻璃陨石研究。如果说有什么人能从明布拉尔的小球体中找到玻璃的话,那就会是斯坦和菲利普。我们也把样品送给了他们。

1991年5月里的一个难忘的日子,艾伦在电话中告知了一件令人惊奇的消息,说在明布拉尔的样品中他找到了保留下来的玻璃小片。刚放下电话听筒铃声又响起,这次是菲利普,他说他和斯坦也发现了明布拉尔样品中有玻璃。不久,在加利福尼亚大学圣迭戈分校工作的一位地球化学家卡斯特纳(Miriam Kastner),还从我们的77号钻井架位提取的样品中分离出细小玻璃碎屑。斯米特、桑德罗和我早就应当更加百折不挠地靠我们自己找到这玻璃,但是我庆幸我们没有那样做,因为同斯坦和菲利普的友谊与合作的不断加深就是极好的回报。那个夏天,随着我们对明布拉尔玻璃的分析工作,我们在戴维斯和伯克利两地间驾车不停地来回奔驰。在1992年的秋天,斯坦突然不幸死于癌症的前后,菲利普跟随我做完了他的哲学博士论文,来到伯克利做博士后研究工作。

在我们与斯坦和菲利普正在研究明布拉尔玻璃的时候,其他人也在另一些实验室中分析着贝洛克玻璃。当撞击的直接化学线索展现在我们面前时,激起了我们的极度兴奋与成

就感。从奇克苏鲁布撞击坑提取到的古老 PEMEX 岩芯的失落是仅有的遗憾事,那些出自撞击地点的失去的熔融岩石样品,本来能使各种化学的和同位素的检验全都得出结果,从而使得我们能可靠地确定那些贝洛克玻璃、明布拉尔玻璃以及所有的其他 KT 喷射物是否真是出自奇克苏鲁布。彭菲尔德在猪粪堆中寻找熔融岩芯而落空的短片除了滑稽,还使人悲伤失望。关键性重大证据搁在离奇克苏鲁布港只有 1 英里(1.6 千米)的地方,但却埋藏在完全没法接近的地下直线距离达 1 英里(1.6 千米)的深处。¹⁶

而且,接近 1991 年年底,从墨西哥传出惊人的新闻,消息出自在 PEMEX 的研究单位墨西哥石油研究所(IMP)工作的地质学家曼努埃尔·格拉哈莱斯(José Manuel Grajales)。曼努埃尔为了寻找奇克苏鲁布岩芯,曾一直在彻底搜查 IMP 的样品档案,在做过一些实际侦查工作后,他终于找到了那些岩芯!岩芯既未丢失也无损坏,它们被精心保存并妥善储藏,只是时间太久使得它们难以被找出。

有些岩芯含有显然由熔融后冷却生成的岩石,这些首批熔融的岩石样品似乎与世界上最珍贵的岩石同样稀少和有价值,就像来自月球的岩石样品那样。但不久,曼努埃尔和其他墨西哥地质学家能找到大量额外的奇克苏鲁布岩芯。对尤卡坦—贝洛克—明布拉尔—KT 链的全面考查终于成为可能。

“冒烟的大炮”

大约到此时,报纸开始把奇克苏鲁布称作 KT 灭绝之谜中“冒烟的大炮”。不错,出自 PEMEX 岩芯的熔融岩石样品确实是关键性重要线索。曼努埃尔和他的 IMP 同事塞迪略—帕尔多(Ernesto Cedillo-Pardo)开始研究熔融岩石。墨西哥的

科学家们慷慨地允许若干其他研究人员参与这些珍贵样品的研究工作。各实验室采用了一系列专门技术后,开始有了成果。有两个研究组——一个设在伯克利与斯坦福,另一个设于休斯敦的月球和行星研究所,由沙普顿(Buck Sharpton)与美国地质调查局的达尔林普尔(Brent Dalrymple)领导——提出报告说,放射性年代测定显示出奇克苏鲁布的熔融岩石生成于KT年代。¹⁷

对撞击坑的产生年代的更有力的证实来自化学组成的研究,研究表明,来源于撞击坑的熔融岩石岩芯中与来自海地和明布拉尔的玻璃陨石中包含着相同的同位素特性。人们越来越相信这些KT玻璃陨石来源于奇克苏鲁布。由于这些玻璃陨石恰好存留在有孔虫灭绝的地层层面上,所以撞击坑必定就是那时形成的。这一结论的背后还有一段与人类有关的戏剧性情节,证实玻璃的撞击起源和奇克苏鲁布熔融岩石岩芯与KT玻璃陨石之间的同位素特性相同的关键性工作,是布卢姆(Joel Blum)和张伯伦(Page Chamberlain)在达特茅斯完成的。¹⁸因为奥菲瑟和德拉克的研究基地在达特茅斯,那里长期以来就代表着反撞击说的观点。这时,对KT事件的两种不同解释在达特茅斯展开了公开论战,在1993年达到最高潮,被称为“达特茅斯恐龙死亡争论”,争论双方的代表人物是奥菲瑟对布卢姆。我原本希望那次是我能听到的一次决斗!

“火海”中的奇克苏鲁布与明布拉尔

斯米特、桑德罗和我天真地认为,地球上最大撞击坑的发现,以及证认到恰好在KT界线上仅几百千米远的海啸地层中有撞击生成的玻璃,将会一劳永逸地查明撞击事件的因果

情节。我们有多傻啊！科学并不沿着这样的路线前进。每个重要结论都遇到严厉挑战，同时全部逻辑推理和解释都须经过检验。这也正是关于奇克苏鲁布与明布拉尔河所发生的情况。挑战方与反挑战方的胜负地位变化十分迅速，并肩僵持的情况往往很难出现。

到我们关于明布拉尔河和 77 号钻井的论文发表的时候，¹⁹撞击说的反对者们已拿出他们的重磅炮弹。奥菲瑟和他的同事们对加勒比海或其附近的所有撞击证据提出非议，特别质疑奇克苏鲁布熔融岩石的撞击起源。²⁰

奥菲瑟还得到在普林斯顿大学工作的有孔虫专家凯勒 (Gerta Keller) 的大力支持，她长期以来就是一位持怀疑态度的人，在 KT 撞击论的墨西哥证据上她成了实力最强大的反对者。凯勒与她的同事施廷内斯贝克 (Wolfgang Stinnesbeck) 和阿达特 (Thierry Adatte) 很快地来到明布拉尔河，对那里的岩层露头作了进一步研究，并对我们的几乎每个论点都提出异议。²¹随后的辩论大多取决于三米厚沙层上下有孔虫化石记录中的细微之处。显然，这是围绕着这些对立观点的主要争论，我们需要有更多的信息作保证。我们非常明白必须返回墨西哥寻找更大量的 KT 界线岩层露头，我们需要进一步鼓起勇气来。桑德罗没有再呆在伯克利，他已重返意大利开始在科尔蒂吉奥科的地质观测台工作，该台是意大利的第一个私人地质研究与教学机构，不久就成为研究撞击问题的主要中心。斯米特和我，携同米莉和斯温伯恩奔向墨西哥。

铺路石与气泡

1991 年 2 月里，在以前的旅程中，我们曾一直感到走进了一个不熟悉的区域，不清楚有意义的岩层露头会在哪里出

现。在我们于最后一天的下午在明布拉尔河终于发现 KT 界线以前,曾接连遭遇多次失望。1992 年 1 月我们重返时的愿望是有幸能找到另一处 KT 界线岩层露头。但本次旅程有所不同,因为我们不但知道要寻找什么而且同行者中有精通地质学的专家。²²

格拉哈莱斯从墨西哥城来到我们之中,他已安排同从墨西哥的该地区来的 PEMEX 野外地质学家们一起工作。我们初次同 PEMEX 坦皮科办事处的古斯曼(Mauricio Guzman)和桑布拉诺(Manuel Zambrano)相遇。他们自己未曾有过针对 KT 间隙的工作经历,但他们查看过 PEMEX 的油田图,并挑出来一个好地方来看。他们选定的目标是拉拉希拉,这是一个靠近低矮水坝的村庄,水坝后面坐落着一处大而浅的水库。上午我们在倾盆大雨中驱车奔向拉拉希拉,沿着泥水淹没的沙石路前行。古斯曼和桑布拉诺乘吉普车走在前头,我们乘着自己的带蓬货车紧随其后。这泥浆曾沉积在墨西哥湾海底静水中,很久之后它缓缓地被抬升到海平面以上。我们正在想像,要是这条碎石路未到那个村庄就到头的话,将会有何种肮脏的行程。曾研究过油田图的格拉哈莱斯突然说:“拉希拉(Lajilla)是单词拉哈(Laja)的指小词”。他接着问道:“你们有谁知道它在西班牙语中是什么意思吗?”我们没人知道。格拉哈莱斯解释说:“它的意思是铺路石!”

我们注视着这片泥泞的沼泽,想着“铺路石”是指什么,开始感到乐观。在我们就要进村庄前转过一段弯路时,果然不出所料,看到了厚厚的沙石岩层缓缓地倾斜着,显露在墨西哥湾这古老的泥沼之上。它就是拉拉希拉的铺路石,村庄赖以建造在其上的坚固基地。倾斜的沙石岩层被一条小河穿过,在那里建造了堤坝,堤坝两端固定在沙石的露头上。千真万确,就像格拉哈莱斯曾猜测的那样,沙石拉哈就是 KT 界线的

岩层。

这是另一处名声很大的露头,其中带有现在像是我们老朋友似的小球体。斯米特对沙层中的海流基岩特别感兴趣,该沙层曾塌落脱离已遭破坏的古代的墨西哥海岸。海流基岩记录了墨西哥湾中海啸搅动起来海底急流反复转向留下的痕迹。古斯曼和桑布拉诺的目标选得好。拉拉希拉变成最有价值的KT界线岩层露头之一。

数天后向北100千米,格拉哈莱斯安排我们参加另一个PEMEX雷诺萨办事处的地质学家工作队。墨西哥的雷诺萨与美国得克萨斯州隔格兰特河相望。在一个名叫特兰将军镇的城中广场上,我们遇见了马丁内斯(Ricardo Martinez)、罗梅罗(Pedro Romero)和鲁伊斯(Eduardo Ruiz),他们是技术精熟的野外地质工作者,工作任务是为了有助于探查埋藏在地下的石油信息,在墨西哥的东北部绘制并研究地面上的岩层露头。他们向我们问道:“你们到底要找什么?”

“就是这种KT界线上特有的岩层,”我拿着从拉拉希拉找到的一个样品向他们解释说。“其中包含着这些小球体颗粒。瞧,你用手持放大镜能看到它们里头的微小气泡。我们怀疑它们是从奇克苏鲁布撞击坑喷射来的熔融小滴。”

马丁内斯、罗梅罗和鲁伊斯惊奇地互相看了看,然后罗梅罗走向他们的吉普车。他拿着一大块岩石走回来,指着其中充满微小气泡的一个小球体,笑嘻嘻地问道:“这就是你们要找的东西吗?”我们都高兴得突然笑了起来。他们在测绘期间,早已发觉到作为KT界线的特定标志的小球体岩层,并横穿新莱昂与坦毛利帕斯州的大部分地区追踪它,但不知道它能说明什么。他们知道它在哪里而我们知道它是什么,真乃完美的结合。

以后的几天里,我们在宏伟的半沙漠地带考察了一个接

一个的 KT 界线岩层露头——埃尔穆拉托,那里标志性岩层峭壁向上倾斜越过泥泞的山坡;埃尔佩尼翁,在那里你可以横越面积有两三个足球场大的 KT 界线沙石岩层的裸露顶部漫步;库奥特莫克,在那里小球体填满了由于海啸而在白垩纪泥潭中冲成的深深沟渠里;而新兰乔,那里 KT 界线的较大沙粒已沉入下层软泥中。每天晚饭过后,马丁内斯、罗梅罗和鲁伊斯都会向我们谈到有关墨西哥东北部的地质情况和历史变革,同时我们会向他们谈论关于 KT 大规模灭绝以及寻找撞击地点的事。在研究了 9 处新的岩层露头之后,我们再没有时间了,在一个奇特的暴风雪天同我们的 PEMEX 同事们告别后,我们满载着供分析用的新样品飞回家乡。



图 16 1992 年 1 月,在墨西哥东北部,寻找 KT 界线的同事们。由左向右为马丁内斯、罗梅罗、鲁伊斯、格拉哈莱斯、斯米特、斯温伯恩、米莉·阿尔瓦雷斯、沃尔特·阿尔瓦雷斯。

转 折 点

1991~1992年的那个冬季似乎是一个转折点。从1980年我与斯米特深信撞击杀灭了恐龙以来,十年多的时间里眼看着支持KT撞击说的证据越来越多,²³但是总有严重的问题和烦人的怀疑经常出现,在竭尽全力探寻撞击地点的过程中多次经受挫折,多次希望破灭。现在,终于有了令人们信服的结果:奇克苏鲁布撞击坑,来自该撞击坑的熔融岩石样品,以及在明布拉尔、贝洛克和77号钻井架位等处探寻到的KT界线玻璃。实验室的成果正到手,尚留下小小的怀疑余地:这些KT界线玻璃是否来源于奇克苏鲁布,以及奇克苏鲁布是否地球上最大撞击坑之一。

我们去墨西哥的第二次旅行具有同样的情趣和意义,所有的事项都有了着落,最终我们真正理解了在白垩纪结束时墨西哥湾及其周围发生了什么情况。²⁴在我们上次旅程中,寻找好几天毫无收获,使我们产生悲观情绪之后,明布拉尔河上的岩层露头像赠给我们的礼品。我们的第二次墨西哥旅程,每件事都有所不同。我们了解寻找什么,日复一日地总能在预期的地方找到新的岩层露头,每个露头都对6500万年前那可怕的时日所发生的事件提供了更多情况。

正是海啸把这项奥秘暴露了出来。在经历过几年的挫折后,最终是海啸的沉积物引导着侦破了犯罪情节,最后所有事情之间都有了合理的联系。对于我本人来说,象征性转折点的到来是在这样一个时刻,即马丁内斯、罗梅罗和鲁伊斯在特兰将军镇的广场上把那些充满气泡的小球体摆在斯米特和我面前的时候,因而导致我们出发横穿塔毛利帕斯和新莱昂去察看KT界线上的海啸岩层。

第七章

奇克苏鲁布事件后的世界

新生代的黎明

白垩纪—第三纪界线标志着地球史中的一次严重的间断。早期的地质学家前辈们正确地把它选定为划分生命进化史中两个独立的基本时代——中生代与新生代,即中期生物时代与近期生物时代的分界线,6 500 万年前,奇克苏鲁布撞击事件发生以后,地球上的生命形态发生了永久性的根本改变。一次偶然事件摧毁了恐龙的漫长、稳固统治时代。新世界以不同的面貌特征承传下来,陆地上生命由以往并不起眼的哺乳类占了统治地位。

值得思考的是,我们每个人都是在致命的石头从天而降后存活下来的某些未知先辈的后代。它们存活下来而恐龙遭到毁灭,于是才有现在的我们和我们这一物种的存在。1.5 亿年的自然选择所赋予恐龙的恩泽,使它们永远较合适于成为地球上大型陆地动物,却在那个可怕的一天中消失了。进化尚未使它们具备从巨大撞击强加的环境灾难里存活下来的能力,浩劫过去了,它们也被一扫而光。

进化同样没有给哺乳动物提供抵抗撞击事件的本领,但不知何故它们竟存活下来了。没人能说出为什么,但哺乳动物比恐龙个头小而数量多得多,这对它们来说谅必有很大的助益,因而从统计上来看有较多幸存的机遇。

当撞击造成的环境剧变稳定下来时,幸存的哺乳类动物

在这新世界中繁衍起来。它们必定经受了巨大的危险并面临着很多机遇。每个物种都进化得使它们的生存方式适应了周围特定环境,即占据了一个特定的生态位(小生态环境)。某些小生态环境必定因物种灭绝而消失,在这个意义上曾以任何方式依赖于恐龙的,或依赖于消失的植物的任何哺乳动物物种也会灭绝。另一些小生态环境必然出现过,最值得关心的是那些大型陆地动物生活的小生态环境。在恐龙灭绝前,恐龙控制着这些小生态环境,而所有的哺乳类动物都很弱小。但是,KT大灭绝以后哺乳类动物进化的最显著的特征之一,就是大型陆地哺乳类动物的进化进程急速。此外,随着各类哺乳类动物明显地找到了各种各样新的小生态环境——开发利用周围世界的新办法,哺乳类动物物种的数目急剧增加了。

对奇克苏鲁布撞击坑的研究

由作为人类的我们的眼光看来,在生命史上最重大的事件之一是人类的智慧及其表现(语言、文字、文化、科学、技术与艺术等)的出现。这是哺乳类单个物种——人类达到的前所未有的成就。从地质学的观点来看,它出现的速率是极其惊人的。与我们个人一生的寿命相比,35 000 年的人类文化进步似乎时间太久,但用地质时期标尺衡量仅是无足轻重的0.035 百万年的时间间隔!运用人类的新才能将要干什么我们并不很明确,但随着20世纪的逐渐结束,或许人类最振奋人心的智力活动将是国际科学探测合作研究——全球奋力研究宇宙、我们居住的行星(地球)、种类几乎无穷无尽的生命,以及我们所见和所研究的一切事物遵循着的大自然运行的根本规律。

由于对撞击地点的10年探寻已经过去,随着奇克苏鲁布

撞击坑的发现,我们独特的科学探求达到一个转折点。从那时起,以往不可能解决的一些问题摆到了面前引起重视。通过对奇克苏鲁布撞击坑及其周围环境的研究,我们此时能对一次巨大撞击所发生的一切做系统深入的探索研究了。撞击速度的规律非比寻常,而且在实验室中无法复制;撞击引发的冲击波与高温完全超越平常的经验,我们很不熟悉。

这就把我们摆在探讨下述最困难问题的较有利位置上了。此问题是,什么类型的环境破坏,造成了各种各样已经灭绝的植物与动物的消失?因为我们未必能见到撞击时刻还活着的霸王龙的标本,很难想像出能揭示消除霸王龙的杀灭机制的任何直接确凿证据。不过,我们得知撞击位置处在石灰岩和硬石膏下面,于是能机智地推测有关杀灭机制。那样的撞击靶必然释放大量二氧化碳与硫。如果撞击发生在海洋中,便会产生极其大量的水蒸气,而撞击到花岗岩或变质岩上只会释放相对少的这类气体。

因此,现在地质学家和地球物理学家们把大部分精力集中到研究奇克苏鲁布撞击坑及其周围环境之上,并且墨西哥的科学家们身居领导地位。或许研究撞击坑本身的最激动人心的措施是 UNAM 浅层钻探计划,它是由马林(Luis Marín)和乌鲁蒂亚(Jaime Urrutia)领导的一项墨西哥城国立大学的研究项目。深层钻探从设计到筹资费时过长且花费过大,而当时有着较轻便的钻探装备并由墨西哥投资的 UNAM,其科学家已经有能力钻探达到埋藏喷射物的地层顶部。UNAM 钻井已回收到第一批新的撞击物质,所取得的岩芯将提供给国际研究团体做研究。

地球物理学家拥有某些研究埋藏于地下的地质构造的间接方法,这些办法被采用得越来越得力。在休斯敦的月球和行星研究所,一个由沙普顿领导的研究组通过对重力轻微变

化的研究,给出了发现一个直径 300 千米的地下环状构造的报告。¹可是希尔德布兰德研究组用同样的重力法却没找到直径大于 170 千米以上的环状构造。²这个差异在科学讨论会上引起了热烈的争论。

关于地下构造更详细的信息来自地震的反射研究。长期以来可供利用的最好地震数据是由得克萨斯大学的巴夫勒(Dick Buffler)于若干年前记录的地震图给出的。横越恰好位于海岸北边的撞击坑的两幅 PEMEX 新地震图,这时由卡马戈和苏亚雷斯(Gerardo Suarez)(他是当时任墨西哥城国立大学研究院院长的一位地球物理学教授)发表了,³更多的地震剖面图正在进行绘制中,即将公布。

所有研究撞击坑的各种方法都携手并进。地震图给出横贯撞击坑的单独详细测量,显示出深层的特征图样。钻孔探测则使验证并解释地震图上所见特征图形成为可能。最后,集中在一块的该地区全部重力测量资料,使得地球物理学家们能扩充二维地震信息,综合提出撞击坑的三维完整图象。

凯文·波普(Kevin Pope)、阿德里安娜·奥坎波(Adriana Ocampo)和杜勒(Charles Duller)所发现的一个完全意料不到的证据痕迹,有力地补充了这些通常的地球物理学方法。凯文是一位对尤卡坦地区有着多年研究经验的洛杉矶顾问地质学家和考古学家,他的妻子阿德里安娜是帕萨迪纳喷气推进实验室的行星科学家和行星表面遥感探测专家,而杜勒在圣何塞附近美国国家宇航局艾姆斯研究中心工作。他们把天然水井的分布标在了尤卡坦地图上。这种水井是一些圆形有泉源的小湖,有它们供应淡水是玛雅文化繁荣的条件之一。他们惊奇地发现这些天然水井都坐落在一个相当完整的圆环上,它勾画出了埋藏在地下的奇克苏鲁布撞击坑的轮廓。我们曾经错误地认为地面上不会有撞击坑的痕迹。还没有人能说清

楚深埋地下的撞击坑怎么能造成远在其上的水泉的位置格局。但天然水井环的存在是不会有错的。⁴

探寻最靠近的岩层露头

当时,在尽可能靠近撞击坑的地带曾加强对 KT 岩层露头的搜寻。在环撞击坑的数百千米范围内,喷射形成的堆积物应当很厚,碎块应该由远而近越来越大。墨西哥的恰帕斯州似乎像是一个查看的较好地区,尽管那里覆盖着热带植被,而且社会也不安定。墨西哥的地质学家们在恰帕斯首先行动,特别是贝穆德斯(Juan Bermudez)同格拉哈莱斯与他的妻子古生物学家罗萨莱斯(Maria del Carmen Rosales)一道前行。另外,菲利普和桑德罗也随同他们走过一些路段。马林和沙普顿也曾研究过恰帕斯的 KT 界线,研究过的还有西于尔兹松。恰帕斯的 KT 岩层露头是独特的。它们似乎记录下来了浅海石灰岩台地边缘的坍塌过程,其石灰岩石震松碎裂成块,被水冲走,最终停留在邻近的深水之中,恰似撞击碎屑落下一样。

我想我们大多数人都在怀疑是否找到了喷射物地层形成的真正岩层露头,毕竟尤卡坦地层一直下沉已经过了 1.5 亿多年,看来不只是撞击坑本身,就连周围的全部喷射物地层也都被后来的沉积物埋藏起来了。可是,凯文和阿德里安娜对天然水井环圈的发现,鼓舞着他们继续在广阔的尤卡坦热带平原上搜寻着岩层露头。他们在尤卡坦半岛上纵横奔波,常常同费希尔查看突现在平坦的地平面上的每座小山丘,并检查了能找到的每个采石场。这次搜寻的成果是,发现了迄今找到的 KT 岩层露头中最激动人心却令人迷惑不解的一处。1995 年 1 月,菲利普、米莉和我加入一个由行星协会发起的

探险队,随同凯文和阿德里安娜、加利福尼亚州立大学诺思里奇分校的弗里奇(Eugene Fritsche)以及墨西哥古生物学家维加(Francisco Vega),共同研究了这个地区。

小国伯利兹地处尤卡坦半岛的东南隅一角,位于墨西哥与危地马拉之间,从奥兰治沃克驱车西行,我们来到一个叫做圣安东尼奥的村庄。洪都河在这儿分流并沿着阿尔比恩岛的两边流过。那里有一座被天然水井围着的低山丘,周围环绕着平坦的旷野。山丘内部新近刚暴露在一个采石场的围墙里。采石场中 25 米以下的暴露区是平坦的白云岩岩层,它是尤卡坦的该地区的特有基岩层。当石灰岩中钙的一半被镁取代后就形成了白云岩,这个过程往往把石灰岩中原来保存的大部分历史信息都抹去了。石灰岩变成白云岩时,化石普遍被毁,使得这些岩石生成的年代很难鉴定。但是维加有着古生物学家锐敏的眼睛,他能从中找到螃蟹化石(他的特殊专长)和蜗牛化石。在维加与斯米特两人经过讨论之后,把其中的蜗牛化石生成年代定为白垩纪的很晚时期,于是这就大大增加了我们对阿尔比恩岛采石场白云岩岩层顶部地层到底是什么的兴趣。

白垩纪基岩层上方是 15 米厚的白云岩碎屑沉积物。凯文和阿德里安娜确信这就是来自奇克苏鲁布撞击坑的喷射物堆积区,但菲利普和我并不以为然。那么巨大的撞击坑应当深深砸进尤卡坦地壳,会把包括来自大陆地壳的花岗岩在内的各种岩块抛出去,可是阿尔比恩岛的岩屑却几乎无例外的全是白云岩,而它只是撞击靶地表的岩石。此外,从撞击坑抛掷出来的大石块应当有棱有角。地质学家们采用了意大利词角砾岩(*breccia*)来称呼一块有棱角的沉积物,我们预期的喷射物层的岩石应当像这种岩石,但该采石场中的白云岩碎块却是圆滚滚的。起先这些观察报告令菲利普和我怀疑它是否

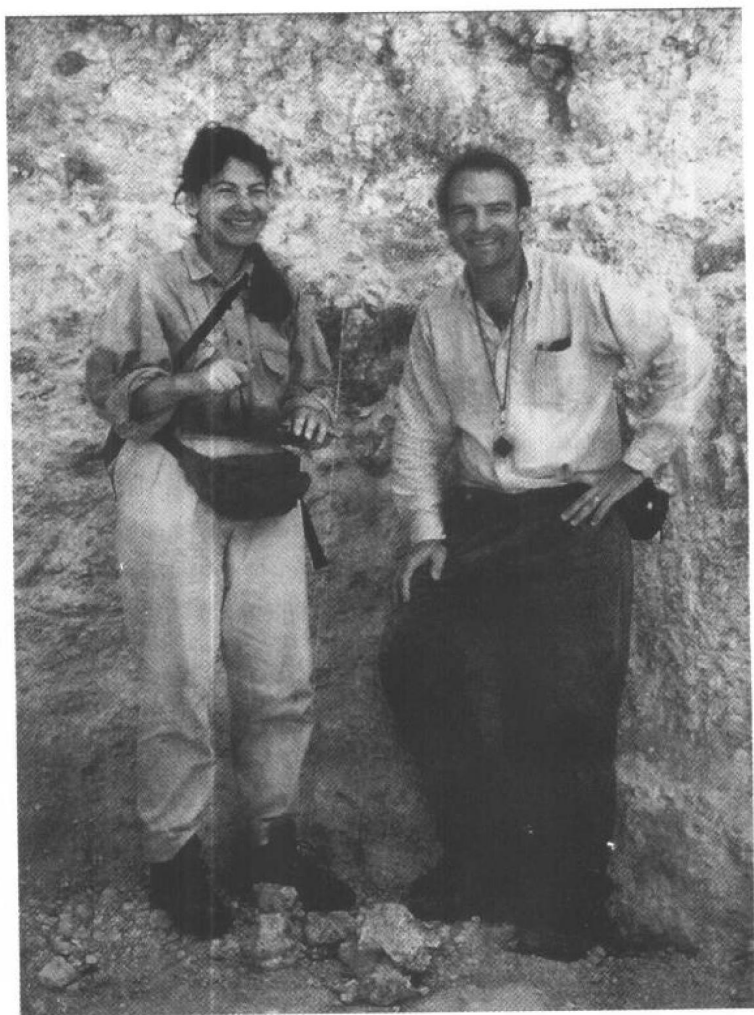


图 17 阿德里安娜·奥坎波和凯文·波普在伯利兹的阿尔比恩岛采石场上,他们在这里发现了最邻近奇克苏鲁布撞击坑的 KT 界线喷射物的岩层露头。

真正的喷射物层。我们日复一日地对该采石场的岩石裸露处反复检验,并就到底是不是奇克苏鲁布来的喷射物进行争论。后来,我们终于相信它主要来源于撞击,因为在石屑层的底部发现,全部白云岩碎屑中存在着独特的小粒黏土物,它们看来似乎已转变为小滴的玻璃。

如若阿尔比恩的沉积地层果真是奇克苏鲁布喷射物洒落层的话,则其意料之外的特点为撞击事件又提供了新的信息。或许该处岩石碎屑并不是主撞击坑抛射来的,而是来自一些次生的撞击坑,原生的真正巨大抛射石块落下产生的次生较小撞击坑只穿透到浅层白云岩。也许抵达伯利兹的岩石碎屑是被裹夹着气体、水与岩石的地面洪流运送来的,于是在运送过程中因冲蚀和摩擦而形成了白云岩石块的圆角形状。还可能另有完全不同的解释。我们在实验室进行的样品分析研究应能给出正确答案。阿萨罗恰在该处喷射物沉积层的最底部中已经发现了铱异常现象,表明其中含有来自撞击物体的物质。福克(Bruce Fouke)是作为研究员来到伯克利的一位研究石灰岩与白云岩的专家,他正在探查阿尔比恩岛白云岩层中记录下来的有关撞击前后以及撞击过程中所发生诸事件的异常详尽历史。随着阿尔比恩岛的样品物质在实验室中的检测,越来越多的新特性显露出来,有望对奇克苏鲁布撞击事件有新的理解。

来自奇克苏鲁布的双重火球

我们一旦知道了撞击坑的地点,就能着手考虑有关喷射物如何撒落到世界各地的过程了。于是我开始对撞击喷射物的弹道轨迹进行计算。奇克苏鲁布撞击火球极其强大,足以把喷射物无阻碍地抛出大气层,使得各种石块及碎屑沿着弹

道轨迹飞行,最终落到轨道所指向的世界各地,形成各处的喷射物堆积。如果是在缓慢自转的月球上,落下的喷射物堆积成的结构样式会比较简单,但我发现在自转较快的地球上,喷射物堆积的结构样式比较复杂,甚至完全不可预测。当喷射物还在高高的空中时,地球一直在喷射物的下方自转,结果是喷射物都落到了它原来瞄准的地点的西边。⁵

有一天,菲利普越过我的肩膀注视着显示所计算的弹道喷射物堆积点的地图时,说道:“看看奇克苏鲁布冲天抛掷的喷射物怎么会落到太平洋里!我要打赌这准能解释詹妮弗找到的受冲击石英。”詹妮弗·博斯特威克(Jennifer Bostwick)是我们系的一位毕业生,她到加利福尼亚大学洛杉矶分校,在凯特和沃森的指导下做研究生。她在研究从太平洋搜集来的KT界线沉积物岩芯时,同凯特有过一个值得注意的发现。他们发现那里的受冲击石英颗粒十分丰富,而在奇克苏鲁布东边同样距离处受冲击石英却非常稀少。受冲击石英这种不对称的分布样式是完全没有预料到的。⁶

但是,观测得到的实际不对称分布,看来与我们在计算机屏幕上显示的计算出来的分布图形恰好一样,不对称分布顿时完全讲得通了,原来地球的自转扭曲了受冲击石英颗粒的落地样式。要想产生这种结果,受冲击石英颗粒必须以陡峭的轨迹抛射。菲利普和我很快就领悟到,如果石英颗粒以 70° 的仰角而熔融喷射物小滴以 45° 的仰角抛射出去,则小滴就会在受冲击石英之前抵达像蒙大拿州这样的地方,因而这就使第五章提到的莫名其妙的双界线地层得到解释。⁷这种双地层是美国西部KT界线层的特点,那里的受冲击石英颗粒分布在由撞击熔融而形成的小滴衍生物小球体的上方。分界非常清楚,以致曾提出用时间略居先后的两次KT界线撞击加以解释。假设石英比撞击熔融物以更陡峭的方向抛射,我们

便能以两层均来自奇克苏鲁布撞击来解释。但是为什么会发生这种情况呢？

我们需要同撞击事件动力学专家谈论此事，恰好此时恰逢苏珊·基弗(Susan Kieffer)造访伯克利。苏珊曾研究过各种快速运动的地质过程，如大峡谷中熔岩瀑布那样的急流；如火山爆发，当圣海伦斯山喷发时她阐明了所发生的情况；如间歇喷泉喷发，她探测老忠实喷泉时利用了沉入喷口的机器人；以及如撞击坑，她在尤金·苏梅克的指导下开始撰写关于亚利桑那州的陨星坑的哲学博士学位论文。⁸ 苏珊是一位优秀的音乐家，有一次她告诉我说，标有慢板记号的乐章总是使她厌烦，她喜爱急板或最轻快的快板，她并且喜欢研究快速运动的地质过程。

菲利普和我告诉苏珊说，如果能找到使石英比熔融小滴以更加陡峭的轨迹被抛出的某种机制，我们就既能对詹妮弗的受冲击石英图样作出解释，也能对双喷射物地层作出解释。对这个抛射机制经过一天思考之后，苏珊提出来一个似乎行得通的解释机制。在很多种岩石所受到的一次撞击中，固体与液体的喷射物，都是差不多以 45° 仰角的轨迹抛射出来的，它们形成了一个范围广阔的环状“喷射物幕”。这个喷射物幕是从“火球”或“蒸气卷流”(由撞击地点发射出的气化的撞击物与靶岩石所形成的云)分离出来的。这种常规的撞击情况通过大量的详情细节已被理解。⁹ 但是，苏珊认为，奇克苏鲁布撞击靶很不一样，在撞击期间其所有石灰岩肯定释放出巨大的 CO_2 蒸气云。必然会生成两个气体火球而不是一个火球，第一个火球是极热的云，由岩石气化而成；第二个火球是温升较低的 CO_2 蒸气云，它是由受较轻撞击的石灰岩释放的。苏珊的计算结果恰好给出了菲利普和我从喷射物图样已推知的动力学机制。看到这个撞击事件的详情细节如此干净利落

的得到解释特别令人满意。¹⁰

后均变理论界的地质学家们

奇克苏鲁布标志着一座分水岭。随着 KT 撞击坑终于被找到,天性排斥一切灾变事件参与的那种僵化的均变论随即破产。尽管严谨的科学家不会怀疑大多数地球变迁是逐渐发生的,但现在地质学家已在自由地探寻不时打断地球史进程的各种偶发灾变事件。

在板块构造革命与 KT 撞击论要求的期待中的变化之间存在着明显的不对称现象。在思想概念上板块构造革命是属于均变论观念,但由于板块构造的证据普遍存在,因此它戏剧性地使几乎所有地质学家改变了其思考方式。板块构造过程至少已连续进行了 10 亿年之久了,它们在岩石中记录的地球史的几乎所有方面都留下了印记。我们的科学接受了板块构造论的深刻改造。

具有讽刺意味的是,随着撞击事件的认可和僵化均变论的破灭,尽管是停留在概念上的灾变说,却对地质学家们产生了潜移默化的影响。撞击事件极少发生,所以很难找到有关证据。除最大的几个撞击事件之外,其余的在地层记录中都很难找到它们发生的情况。像严重而强烈到足以造成大规模灭绝的 KT 界线事件这样的大撞击,因其形成了撞击地层的上层与下层中化石的重大差异,所以容易在岩石记录中把它们找出来。寻找那些对生命没有产生令人注目影响的较小撞击事件是十分困难的,发现由其造成的沉积更多地靠机遇。

然而,还是出现了缓慢进步,地质学家现在知道在世界不同部分有几处撞击喷射物沉积的地层记录。这类撞击证据补充了已知的撞击坑一览表,¹¹该表中已知撞击坑目前已达到

130 个左右。地层记录中的喷射物层涵盖的年代范围从极其古老的年代直到很近的时期。其中有些与大规模灭绝事件有联系;另外一些则因撞击轻微而仅仅影响到局部的生物。

在斯坦福大学供职的洛(Don Lowe)从事着前寒武纪沉积岩研究工作,该种岩层沉积于丰富的化石出现以前很久远的时代。小球体岩层引起他的兴趣,进而他证明它们是来源于一次古老的撞击的喷射物。¹²戈斯丁(Victor Gostin)和他的同事们在澳大利亚的前寒武纪沉积层序列中发现了一层撞击喷射物,且他们能证明它来自约 300 千米外的阿克拉曼撞击坑。¹³

由于几乎不存在化石,所以在前寒武纪地层中没有生物灭绝的证据,但是从前寒武纪结束以来 5.7 亿年的详细化石记录,给出了 5 次大规模灭绝和大概 5 次较小规模灭绝的证据。KT 界线是 5 次大规模灭绝中最近的一次,它比其他的任何一次都提供了更多得多的信息。在早期 KT 研究工作中,我们伯克利研究组曾认为所有的灭绝都是由撞击造成的。也许至今仍然这样认为,¹⁴但重要的是要强调一点,任何其他的灭绝事件都不能与在 KT 界线处所发现的大量完整的撞击证据相比。

不过,也确实存在着一些逗弄人的证据。在大约 3.65 亿年前的泥盆纪晚期,介于弗拉斯期与法门期之间的界线上发生过一次较大灭绝。这次灭绝显得如此突然,因此加拿大古生物学家和地质学家麦克拉伦(Digby McLaren),在他 1970 年向美国古生物学会所作的主席演说中提出,这次灭绝可能是由一次撞击事件造成的。¹⁵麦克拉伦的意见超越它的时代 10 年,因而被完全忽视了。但是,近来王坤(Kun Wang)在中国已经找到弗拉斯—法门界线处撞击形成的玻璃小球体;¹⁶卡西尔(Jean - Georges Casier)和克拉伊斯也在比利时找到了同样

的证据。¹⁷现在,麦克拉伦被人们视为一位先知。

另一次大灭绝发生在2亿零5百万年前的三叠纪—侏罗纪的界线上,当比奇(Dave Bice)和卡特林·牛顿(Cathryn Newton)在意大利的一处那个时期的岩层露头中找到受冲击石英颗粒时,给出了其起源于一次撞击的证据。¹⁸在接近3400万年前的始新世—渐新世的界线处,有一次较小的不太突然的灭绝事件,由蒙塔纳里领导的一个研究组曾深入地研究过这个事件,从其产生的受冲击石英和铍异常的分析研究,给出它产生于几次撞击的证据。¹⁹已找到属于那一时期的两个巨大撞击坑,一个在西伯利亚,另一个在切萨皮克湾的海底。²⁰

其他偶然被翻腾到地面上的有关撞击的地层学证据,其所在地层未显示有灭绝事件的迹象。凯特对时代定为从230万年前起始的上新世里发生的一次较近撞击所产生的喷射物进行了广泛研究,他是在南太平洋的一偏僻处洋底沉积物中发现了这种喷射物的。²¹

瓦尔姆(John Warme)和他的来自科罗拉多矿业学院的学生们,在内华达州的南部围绕阿拉莫的群山中,找到了所有沉积中最为壮观的撞击沉积层。在他们研究似乎均属正常的泥盆纪地层的底部石灰岩时,逐渐认识到办公楼大小的巨大基岩层石块已经崩毁松动,而石灰石碎屑的灰泥注满它们下部,在这由略有移位的大石块排成的阵列顶部,他们发现了一层角砾岩沉积,它是在泥盆纪里由覆盖内华达州这一地带的浅海底地层中撕碎的带棱角的石屑构成的。从大块石头到角砾岩屑,阿拉莫堆积物提供的印象是,海底发生过突然间的猛烈崩毁,基岩层的最浅部分被撕松,较深地层的庞大区域被抬起。瓦尔姆把这种由巨石块与石屑形成的奇特组合称做阿拉莫角砾岩。当他认真考虑这一构造记录下来的明显猛烈过程是不是大撞击或某种其他灾难造成的结果时,他曾邀请过许

多地质学家同他一起视察该地区。最后,当他确定无疑地在该处角砾岩中找到了受冲击石英颗粒之后,终于同撞击建立了因果联系。²²瓦尔姆当前的想法是,发生在海洋西边的一次大撞击,形成巨大海啸,当海啸袭击到内华达的大陆边缘时,造成了这次对海底的大破坏。这次撞击一度似能对泥盆纪晚期弗拉斯期—法门期较大灭绝作出解释,但是由桑德伯格(Charles Sandberg)认真进行的古生物年代确定表明,阿拉莫角砾岩撞击事件要比该次较大灭绝约早3百万年。²³这似乎只是一次足以在大陆边缘将壮丽风光摧毁而不足以破坏全球生物圈的撞击。

在成层的沉积物中所保留的撞击事件的记录十分贫乏,至今已知的撞击坑比喷射物沉积要多得多。但能预期撞击的地层记录将会增加,因为越来越多的地质学家熟悉撞击事件,所以当他们碰到喷射物沉积时就能识别它们了。

是火山活动造成的吗?

作为地质活动过程的撞击事件,长期以来被地质学家们忽视了。现在,必须把它当作虽然稀少然而却是一类重大事件来看待,何况它至少是造成KT大规模灭绝的明显原因。火山活动通常曾是地质学家们的首要兴趣所在,有些地质学家曾经提出KT灭绝是由火山活动造成的。既然有将撞击事件作为造成那次生物转折点的原因的这样一种有力的事例,火山活动能从造成全球后果的灾变事件目录表中勾销吗?

看来,至今还是不能勾销。因为还遗留着火山活动以某种方式介入的使人引起兴趣而又难解的一些暗示。例如,第五章曾提到,麦克莱恩曾提出印度巨大火山活动地区的“德干圈闭”²⁴是KT灭绝的起因,库尔蒂约的研究组所确定的年代

显示它非常接近 KT 界线。然而它们之间带有许多土质层的熔岩流表明,对于短暂的 KT 灭绝事件来说,德干火山活动延续时间有过长之嫌而不能作为灭绝起因。如果不是意外地出现了第二个如此相一致的年代例证,我原本会把德干圈闭与 KT 撞击—灭绝事件之间表观上的年代相合的例证舍弃了。

在所有灭绝事件中,最大的一次是 2.5 亿年前发生于二叠纪—三叠纪界线间的灭绝事件。²⁵因为在全世界任何地方实际上都没有跨越二叠纪—三叠纪界线的地层学记录保留下来,所以既没有支持也没有反对在那时发生撞击的证据。从另一方面看,大陆上最巨大的熔岩溢出是西伯利亚圈闭,它非常像德干圈闭,但容积要大得多。最近,伦尼(Paul Renne)在伯克利地质年代学中心对西伯利亚圈闭和二叠纪—三叠纪界线两者都取得了可靠的年代数据,²⁶它们的年代区分不开!

一位优秀的侦探不应当忽视像 KT—德干这样的年代符合一致的情况,哪怕是唯一的符合。在受到了像西伯利亚圈闭与二叠纪—三叠纪界线这样的第二个年代符合一致事例的支持后,它就必定是值得注意的。但现时我不知道有谁能对撞击事件、火山活动和大规模灭绝之间的联系作出合理解释。撞击事件触发火山活动,同时造成大规模灭绝的明显想法看起来不尽合理,因为奇克苏鲁布远离印度。²⁷我们当前正处在一个科学家们特别欣赏的局面下——面对一个深具魅力的奥妙问题,已掌握某些明显的重大线索,但最终的合理解释是什么,没有人能说得清楚。

大撞击的重演

火山活动在对地球上灾变事件的最后理解中将起什么作用至今尚不清楚。不过,随着撞击坑的已知数目以每年两三

个的速率在目录表中增加,和随着有越来越多的场所在岩石记录中发现了撞击碎屑,有越来越多的地质学家正在接受着如下观点:就像显然发生在太阳系中其他星球上的类似情况,在地球上受到彗星和小行星的撞击也属平常事。因为尤卡坦撞击事件具有足以造成大规模灭绝的特大量级,所以比较特殊,但也只不过是各种量级撞击所构成的连续集中的较大事件之一而已。不时有大大小小各种尺寸的天体落到地球上,体积小的天体降落得更加频繁得多。最小的天体,如沙粒般大小或甚至更小,落不到地球表面上,它们在大气高层因摩擦而燃烧掉了,形成我们称为流星的道道光迹。流星出现非常频繁,在远离明亮灯光的黑暗夜空中几乎每隔几分钟就能看到一颗。

有人会这样想,在天空看到的仅有的碰撞现象,就是由微陨星形成的光迹。但是,出乎人们意料的是,完全确认均变论地质学终结的戏剧性事件,不是向下察看记录着地球史的岩石得到的,而是向上观察天空得到的。

在对撞击坑不断深入的理解方面,在地质学向太阳系扩展方面,和在埋葬 19 世纪均变论的教条方面,尤金·苏梅克胜过其他任何人,处在更重要的中心地位上。从他早年用一具小型望远镜研究月球,梦想登月,到他证明亚利桑那州的陨星坑是一种撞击伤疤,到他为登月计划训练宇航员,到他对一个接一个深空探测器研制的学术领导,到他有关 KT 界线撞击的一系列发现,到他为了研究撞击坑在澳大利亚沙漠上的许多次探险等等,尤金总是身处最前线。*

因此,这出撞击一灭绝正剧的最后一幕理应以尤金·苏梅

* 1997 年 7 月 18 日,尤金·苏梅克在澳大利亚寻找陨星坑时因车祸逝世。他的部分骨灰被“月球勘测者”号航天器带到月球上安葬。——译者

克、他的妻子卡罗琳和他们的朋友戴维·利维(David Levy)为主角。²⁸多年来,在每个月没有月光的黑夜里,尤金和卡罗琳,常有戴维伴随,总会到位于帕洛玛山的天文台,他们在那里反复地拍摄下一系列天空照片,逐步建立起越地小行星的普查记录档案。这些小天体是一些其轨道能与地球轨道相交的太空石块,因此有机会击中我们的地球。尤金想确切地了解这类潜在的威胁有多大,平均起来它们击中地球的次数有多少,以及我们是否应当对某种突发性危险有所预防。

卡罗琳在认定照相底片上出现的小行星与彗星方面独具慧眼,所以往往是她大声地向尤金和戴维说:“看这儿,我认为我拍到了被压碎的彗星!”明晰照片很快显示出他们发现的彗星并不是被压碎的,而是被撕裂的。取名为苏梅克-利维9号的周期彗星已被木星捕获,所以它环绕这颗巨行星运转,而不是绕太阳转。在卡罗琳注意到这颗彗星之前不久,该彗星在一次通过时由于太靠近木星,强大的木星引力把它撕裂成为碎片,因尘埃从刚撕裂的碎块表面散去了,使以前显得死气沉沉的彗星形成的碎片在阳光中闪闪发光。

彗星碎片的轨道已计算出来,令天文学家和地质学家感到惊喜的是,计算结果明确地指出,它们下次经过时就要撞到木星上。人们急促而狂热地制定观测计划,当1994年7月该彗星的碎片冲向木星的时刻,建立在地面上和运行于太空的所有各种类型的望远镜,都瞄准在即将撞击到的木星表面位置上。撞击出现的景象甚至要比任何人大胆想像的更加壮观。当大块碎片冲入深不可测的木星大气时,受冲击物质的热柱上升在巨大木星的上方有数千千米高,随后在木星无比强大的重力作用下塌缩在大气顶部。塌缩产生的强烈热爆炸,在地面上通过望远镜能在红外光波段看到。

大自然在人类的安全距离之外进行了一次人们自己没法

做到的大型实验。天文学家们对望远镜中所看到的景象深感敬畏,我们这些为了让地球史学家们接受撞击事实而参与尤金·苏梅克的长期奋战的人们,更是在敬畏之余还深感满足。这正是对大撞击不仅仅存在于远古时代的无可争辩的证明。就在当前它们也能发生而且确实还在发生。

木星上撞击地点发生的热爆炸,不但在理性上让人满足,而且还令人头脑清醒和深为感动。因为当我们注视着另一个行星上正遭受暴力事件时,我们正在观看一幅重现的霸王龙曾目击过的最后景象,即在中生代世界结束的日子里从带来厄运的撞击坑发出的死亡闪光。

注 释

第一章 大劫难

1. 陨星是太空中落下的固体碎片,在地面上能够拾到它们。通常很难知道单个的陨星是来源于小行星还是彗星。
2. 为了说明撞击天体的直径是怎样计算出来的,可参看 Harte, J., 1988, Consider a spherical cow: Mill Valley, CA, University Science Books, 283 p. (p. 7~9)。
3. 撞击速度必然至少是 11 千米/秒——地球上的逃逸速度,它是一个火箭为了脱离地球的引力束缚而必须达到的速度,因而它也是降落到地球上的任一天体所拥有的速度。但是小行星和彗星一开头以其初始速度前进,因而会以超过 11 千米/秒的速度撞击地球。一个在火星轨道和木星轨道之间围绕太阳公转,并且和地球公转方向相同的小行星开始朝向我们趋近时,它会以大约 20 千米/秒的速度撞击地球。一个从太阳系极外边缘飞来的彗星,它围绕太阳公转方向可能和地球公转方向相反,它能够以高达 70 千米/秒到 80 千米/秒的速度迎面击中地球。20 千米/秒和 80 千米/秒之间,速度相差 4 倍,转变为动能,则动能相差 16 倍,因为动能与速度的平方成正比关系($K.E. = mv^2/2$)。由于我们不知道撞击天体是小行星还是彗星,因此,撞击速度仍是不能确定的,撞击能量也仍是非常不确定的。这里采用的 30 千米/秒的撞击速度是随意选取的,即采取了可能具有的速度范围中的中间值。
4. 阿特金斯对自然界的能量定律给出了一个清晰和细致的介绍。参看 Atkins, P. W., 1984, The second law: New York, Scientific American Library, (W. H. Freeman), 230 p.
5. Melosh, H. J., Schneider, N. M., Zahnle, K. J. and Latham, D., 1990, Igni-

- tion of global wildfires at the Cretaceous/Tertiary boundary: *Nature*, v. 343, p. 251 ~ 254.
6. Wolbach, W. S., Gilmour, I., Anders, E., Orth, C. J. and Brooks, R. R., 1988, Global fire at the Cretaceous-Tertiary boundary: *Nature*, v. 334, p. 665 ~ 669.
7. Bourgeois, J., Hansen, T. A., Wiberg, P. L. and Kauffman, E. G., 1988, A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas: *Science*, v. 241, p. 567 ~ 570.
8. Toon, O. B., Pollack, J. B., Ackerman, T. P., Turco, R. P., McKay, C. P. and Liu, M. S., 1982, Evolution of an impact-generated dust cloud and its effects on the atmosphere: *Geological Society of America Special Paper*, v. 190, p. 187 ~ 200.
9. Lewis, J. S., Watkins, G. H., Hartman, H. and Prinn, R. G., 1982, Chemical consequences of major impact events on Earth: *Geological Society of America Special Paper*, v. 190, p. 215 ~ 221; Pope, K. O., Baines, K. H., Ocampo, A. C., and Ivanov, B. A., 1994, Impact winter and the Cretaceous/Tertiary extinctions: results of a Chicxulub asteroid impact model: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 128, p. 719 ~ 725.
10. 许多古生物学家现在把中生代灭绝的恐龙叫做“非鸟类恐龙”，依据的证据是鸟类是恐龙种系的一部分。
11. Feduccia, A., 1995, Explosive evolution in Tertiary birds and mammals: *Science*, v. 267, p. 637 ~ 638.
12. Johnson, K. R. and Hickey, L. J., 1990, Megafloal change across the Cretaceous/Tertiary boundary in the northern Great Plains and Rocky Mountains, U. S. A.: *Geological Society of America Special Paper*, v. 247, p. 433 ~ 444.
13. Ward, P. D., A review of Maastrichtian ammonite ranges: *Geological Society of America Special Paper*, v. 247, p. 519 ~ 530.
14. Smit, J., 1982, Extinction and evolution of planktonic foraminifera after a major impact at the Cretaceous/Tertiary boundary: *Geological Society of America Special Paper*, v. 190, p. 329 ~ 352.

第二章 由岩石天书解读地球史

1. 更精确地说,地球的年龄是46亿年,但取整数50亿年就充分接近实际了,而且为考察地球史的目的也较容易记忆。通常把地球的年龄表述为4.6十亿年,但我觉得直接使用百万年这个单一基本时间单位作专门用语来考虑地球史上的所有事件更有益。
2. 从逻辑推理来看,似乎应把“年代”这个词限定用在根据放射性衰变确定的数字年龄上,而由化石确定的近似时间范围另用某个词表示。但地质学家认为无论是化石还是放射性都是确定岩石年代的方法,并且区别其“化石年龄”和“数字年龄”都是必要的。
3. 一个很好的例证来自古比奥的KT界线上方第三纪海洋沉积物: Montanari, A., Drake, R., Bice, D. M., Alvarez, W., Curtis, G. H., Turrin, B. D. and DePaolo, D. J., 1985, Radiometric time scale for the upper Eocene and Oligocene based on K/Ar and Rb/Sr dating of volcanic biotites from the pelagic sequence of Gubbio, Italy: *Geology*, v. 13, p. 596 ~ 599.
4. 对地质年代表的最新的全面概述,请参见: Harland, W. B., Armstrong, R. L., Cox, A. V., Craig, L. E., Smith, A. G. and Smith, D. G., 1990, *A geologic time scale 1989*: Cambridge, Cambridge University Press, 263 p.
5. 对渐进进化的一次重大挑战曾由古生物学家埃尔德雷奇和古尔德挑起,他们发现了间断均衡的证据:即个别物种在很长的时间间隔里是稳定的,而新物种的出现却急速发生。Eldredge, N. and Gould, S. J., 1972, Punctuated equilibria: An alternative to phyletic gradualism, In Schopf, T. J. M., ed., *Models in paleobiology*: San Francisco, Freeman, Cooper and Co., p. 82 ~ 115; Gould, S. J., 1984, Toward the vindication of punctuational change, in Berggren, W. A. and Couvring, J. A. V., eds., *Catastrophes and Earth history; The new uniformitarianism*: Princeton, Princeton University Press, p. 9 ~ 34.
6. Luterbacher, H. P. and Premoli Silva, I., 1962, Note préliminaire sur une revision du profil de Gubbio, Italie: *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, v. 68, p. 253 ~ 288.

7. The full history of research on magnetic reversals and plate tectonics is told by Glen, W., 1982, *The road to Jaramillo*: Stanford, Stanford University Press, 459 p.
8. Upper Cretaceous-Paleocene magnetic stratigraphy at Guppio, Italy: Geological Society of America Bulletin, v. 88, 1977, p. 367 ~ 389. Part I: Arthur, M. A. and Fischer, A. G., Lithostratigraphy and sedimentology; Part II: Premoli Silva, I., Biostratigraphy; Part III: Lowrie, W. and Alvarez, W., Upper Cretaceous magnetic stratigraphy; Part IV: Roggenthen, W. M. and Napoleone, G., Upper Maastrichtian-Paleocene magnetic stratigraphy; Part V: Alvarez, W., Arthur, M. A., Fischer, A. G., Lowrie, W., Napoleone, G., Premoli Silva, I. and Roggenthen, W. M., Type section for the Late Cretaceous-Paleocene geomagnetic reversal time scale.
9. Lowrie, W. and Alvarez, W., 1981, One hundred million years of geomagnetic polarity history: *Geology*, v. 9, p. 392 ~ 397.
10. The KT boundary clay layer was first pointed out by Luterbacher, H. P. and Premoli Silva, I., 1964, Biostratigrafia del limite cretaceo-terziario nell' Appennino centrale: *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, v. 70, p. 67 ~ 128, Fig. 3.

第三章 渐变论者对灾变论者

1. 古尔德 (1987, *Time's arrow, time's cycle*: Cambridge, Harvard University Press, 222p.) 曾经仔细地分析过赫顿和赖尔的著作。看见了这些人的非传统的画像, 他称之为“教科书封面上的肖像”, 发现了一部更复杂、更理性的历史, 它深刻地反映了指导甚至控制赫顿和赖尔进行何种野外考察的哲学观点。
2. Muir, J., 1894, *The mountains of California*: Century, New York, chapter 1., Reprinted in Muir, J., 1992, *The eight wilderness discovery books*: Dialectem, London, 1030p., see p. 301. 我曾经长期认为缪尔是因为这次航行而成为渐变论者, 但最近德费耶 (Ken Deffeyes) 向我指出, 在另外场合下, 缪尔曾被错认为是一位灾变论者, 他曾用大地震的震落解释山中倒石堆斜坡的形成。

3. 贝利(E. B. Bailey)对阿尔卑斯山冲断层的发现作了一个精彩的讲述。1935/1968, *Tectonic essays, mainly Alpine*: Oxford, Oxford University Press, 200 p., especially chapter 4.
4. 这种研究地质过程的方法被错误地称为现实主义(actualism)的方法,源自拉丁语“actual”,意为“现在的”。
5. 古尔德(1965, *Is uniformitarianism necessary?*: American Journal of Science, v. 263, p. 223 ~ 228)说明赖尔怎样用他自己的有影响的《地质学原理》一书(Lyell, C., 1830 ~ 33/1990 ~ 91, *principles of Geology*, reprint of the 1st edition: Chicago, University of Chicago Press, v. 1 ~ 3),使地质学家们相信,全部地球史都是缓慢的、渐进的和宁静的过程,赖尔在《地质学原理》一书中自始至终交替使用“均变”一词用于两个完全不同的概念。赖尔用“均变”一词的第一个意义是,自然界的规律是不随地点的变化和时间的流逝而改变的,这是所有科学家共同的假定,是科学方法的基础,地质学家对此并无异议。然而赖尔也用“均变”一词于地球史研究中,却在与他同代人中引起很大争论,而现在我们知道它是错的。赖尔相信变化速率是均匀的或者说变化是渐渐进行的观点,即是说,地球在过去发生的变化并不比现在发生的变化快得多,处于匀速变化的状态。他相信过去地球上的情况永远和现在地球上的情况近于相同的理念。由于把状态和速率的均变性同无争议的自然界规律的不变性纠缠在一起,赖尔使这些不正确的观点为同代人所接受并成为神圣的均变主义教条传给未来的地质学家们。
6. Lyell, C., 1830 ~ 33/1990 ~ 91, op. cit., v. 3, p. 328.
7. Browne, J., 1995, *Charles Darwin: voyaging*: Princeton, Princeton University Press, 605p., esp. p. 186 ~ 190.
8. 古尔德引用。1982, *The panda's thumb*: New York, W. W. Norton, 343 p. (p. 179).
9. 勃雷茨和华盛顿州东部大洪水的故事是古尔德讲的。1982, 见前引书第 19 章。
10. 贝克(Baker, V. R.)叙述了帕迪的作用。1995, *Surprise endings to catastrophism and controversy on the Columbia-Joseph Thomas Pardee and*

- the Spokane Flood controversy: *GSA Today*, v. 5, p. 169 ~ 173.
11. Baker, V. R. , The Spokane Flood controversy, chap. I, p. 14, in Baker, V. R. and Nummedal, D. , 1978, *The Channeled Scabland: NASA Planetary Geology Program*, Washington, DC, 186 p.
 12. 马文首先注意并探测板块结构的均变性特征和在行星和卫星上可见占压倒优势的灾变性撞击的证据情形。Marvin, U. B. , 1990, *Impact and its revolutionary implications for geology: Geological Society of America Special Paper*, v. 247, p. 147 ~ 154.
 13. Wegener, A. , 1929/1966, *The origins of continents and oceans* (translated from the German by J. Biram): New York, Dover, 246 p.
 14. Cox, A. , ed. , 1973, *Plate tectonics and geomagnetic reversals*: San Francisco, W. H. Freeman, 702 p. ; Allègre, C. J. , 1988, *The behavior of the Earth: continental and sea-floor mobility*: Cambridge, MA, Harvard University Press, 272 p.
 15. Cox, A. and Hart, R. B. , 1986, *Plate tectonics: how it works*: Palo Alto, CA, Blackwell, 392 p.
 16. Winchell, A. , 1886, *Walks and talks in the geological field*: New York, Chautauqua Press, 329 p. (p. 252).
 17. Schuchert, C. and Dunbar, C. O. , 1933, *A textbook of geology, Part II — Historical Geology* (3rd edition): New York, Wiley, 551 p. (p. 381).
 18. 几年后经过仔细分析,古生物学家西格诺尔和利普斯证明,对于一次真正的突然灭绝,化石记录越贫乏,渐进的灭绝似乎显得越明显。这被称为“西格诺尔—利普斯效应”。Signor, P. W. and Lipps, J. H. , 1982, *Sampling bias, gradual extinction patterns, and catastrophes in the fossil record: Geological Society of America Special Paper*, v. 190, p. 291 ~ 296.
 19. Terry, K. D. and Tucker, W. H. , 1968, *Biologic effects of supernovae: Science*, v. 159, p. 421 ~ 423.
 20. Russell, D. and Tucker, W. , 1971, *Supernovae and the extinction of the dinosaurs: Nature*, v. 229, p. 553 ~ 554.

第四章 铱元素

1. Alvarez, L. W., Anderson, J. A., El Bedwei, F., Burkhard, J., Fakhry, A., Goneid, A., Hassan, F., Iverson, D., Lynch, G., Miligy, Z., Moussa, A. H., Sharkawi, M. and Yazolino, L., 1970, Search for hidden chambers in the Pyramids: *Science*, v. 167, p. 832 ~ 839.
2. 马勒曾相当详细地谈到这个故事情节。Muller, R. A., 1988, *Nemesis: the death star (The story of a scientific revolution)*: New York, Weidenfeld and Nicolson, 193 p.
3. 在元素周期表中,该 6 种铂族元素(钌、铑、钯、铱、铂与铑)成为一组。在太阳系中均属稀有元素,并具有颇为相似的化学性质。
4. 不可能测出绝对精确的浓度,因此所测结果及其分析不确定度一并给出。例如,铱值(20 ± 5)ppb(2σ)读作“20 加减 5ppb, 2 个标准偏离不确定度”,意即阿萨罗以 95% 的确信度认为该真值在 15 与 25ppb 之间。
5. 数年之后我们发现,整批样品曾被整理它们的技术员手指上的一枚白金结婚戒指中的微量铱污染过!
6. Sarna-Wojcicki, A. M., Morrison, S. D., Meyer, C. E. and Hillhouse, J. W., 1987, Correlation of upper Cenozoic tephra layers between sediments of the western United States and eastern Pacific Ocean and comparison with biostratigraphic and magnetostratigraphic age data: *Geological Society of America Bulletin*, v. 98, p. 207 ~ 223.
7. 阿萨罗对首次铱测定是怎样进行和如何完成的各种考虑作过详细说明。参见 Asaro, F., 1987, The Cretaceous-Tertiary iridium anomaly and the asteroid impact theory, p. 240 ~ 242, in Trouwer, W. P., ed., *Discovering Alvarez—Selected works of Luis W. Alvarez with commentary by his students and colleagues*: Chicago, University of Chicago Press, 272 p.
8. Terry, K. D. and Tucker, W. H., 1968, Biologic effects of supernovae: *Science*, v. 159, p. 421 ~ 423; Russell, D. A. and Tucker, W., 1971, Supernovae and the extinction of the dinosaurs: *Nature*, v. 229, p. 553 ~ 554; Ruderma, M. A., 1974, Possible consequences of nearby supernova explosions for atmospheric ozone and terrestrial life: *Science*, v. 184, p. 1079 ~ 1081.

9. 在 1987 年,最晚近的“邻近”超新星发生在毗邻银河系的一个星系中,这大大加深了对恒星爆发的理解。道贝尔和马勒描述了 1987 年超新星的科学研究情况。Dauber, P. M. and Muller, R. A., 1996, *The three big bangs*: New, York, Addison-Wesley, 207 p.
10. 自从地球约在 46 亿年前形成以来,就钚 244 而言,大约过去了 55 个半衰期(8 300 万年的半衰期时间)。在每个半衰期期间,该 8 300 万年周期开始时所存在的原子的一半衰变了,因此当钚 244 经过了 55 个半衰期后,减少到 $1/(2^{55})$,或者说约为其原始丰度的 3×10^{-17} ,远远低于期望从 KT 超新星获得的水平,而且实际上是检测不出来的。
11. 海伦的姓发音作迈克尔(Michael)。
12. 阿萨罗和海伦在附近另一个实验室,经过很大努力实验取得了首例样品中的不纯度数据。不纯度极低以致只能采用像 NAA 那样的极其灵敏的技术才能检测出来:参见 Asaro, F., 1987, *The Cretaceous-Tertiary iridium anomaly and the asteroid impact theory*, in Trouwer, W. P., ed., *Discovering Alvarez: selected works of Luis W. Alvarez, with commentary by his students and colleagues*: Chicago, University of Chicago Press, p. 240 ~ 242; Alvarez, L. W., 1987, *Alvarez-Adventures of a physicist*: New York, Basic Books, 292 p.
13. 该汇编表明 KT 事件前的 5 ~ 10 个百万年中存在着 2561 个类属,而 KT 事件之后的 5 ~ 10 个百万年中存在 1392 个类属,即 54% 幸存下来,或许更低些,这要看有多少第三纪类属是新进化出来的:参见 Russell, D. A. and Rice, G., eds., p. 41 ~ 42, 1982, *K-TEC II—Cretaceous-Tertiary extinctions and possible terrestrial and extraterrestrial causes*: Syllogeus, National Museums of Canada, Ottawa no. 39, 151 p.
14. Sepkoski, J. J., Jr., 1982, *Acompendium of fossil marine families*: Milwaukee Milwaukee Public Museum, 125 p.; Raup, D. M. and Sepkoski, J. J. Jr., 1982, Mass extinctions in the marine fossil record: *Science*, v. 215, p. 1501 ~ 1503; Raup, D. M. and Sepkoski, J. J. Jr., 1983, Mass extinctions in the fossil record: *Science*, v. 219, p. 1239 ~ 1241.
15. 迪茨是一位知名的异教徒。仅数年后他就获得了彭罗斯奖章——

- 美国地质学会最高荣誉——确认他关于板块构造与撞击成坑观点原来是正确的,而当时大多数地质学家都在诅咒这两个理论。
16. 霍伊特评述了围绕陨星坑起源的激烈争论。Hoyt, W. G., 1987, *Coon Mountain Controversies—Meteor Crater and the development of impact theory*: Tucson, University of Arizona Press, 442 p. 该陨星坑争论预示着围绕 KT 撞击假说论战的来临。
 17. 布赫(Walter Bucher)是这些“陨石坑”由内因而形成的最有力的倡议者。Bucher, W. H., 1963, *Cryptoexplosion structures caused from without or from within the Earth? (“astroblemes” or “geoblemes”?)*: *American Journal of Science*, v. 261, p. 597 ~ 649. 布赫的这篇论文后附一篇主张撞击起源的讨论文章——Dietz, R. S., 1963, *Cryptoexplosion structures: a discussion*: *American Journal of Science*, v. 261, p. 650 ~ 664.
 18. Symons, G. J., ed., 1888, *The eruption of Krakatoa, and subsequent phenomena*: Royal Society, London, 494 p.
 19. Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. and Michel, H. V., 1980, *Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction*: *Science*, v. 208, p. 1095 ~ 1108.
 20. Smit, J. and Hertogen, J., 1980, *An extraterrestrial event at the Cretaceous-Tertiary boundary*: *Nature*, v. 285, p. 198 ~ 200.
 21. Kyte, F. T., Zhou, Z. and Wasson, J. T., 1980, *Siderophile-enriched sediments from the Cretaceous-Tertiary boundary*: *Nature*, v. 288, p. 651 ~ 656.
 22. Ganapathy, R., 1980, *A major meteorite impact on the Earth 65 million years ago: evidence from the Cretaceous-Tertiary boundary clay*: *Science*, v. 209, p. 921 ~ 923.
 23. Orth, C. J., Gilmore, J. S., Knight, J. D., Pillmore, C. L., Tschudy, R. H. and Fassett, J. E., 1981, *An iridium abundance anomaly at the palynological Cretaceous-Tertiary boundary in northern New Mexico*: *Science*, v. 214, p. 1341 ~ 1343.

第五章 寻找撞击地点

1. Glen, W., ed., 1994, *The mass-extinction debates: How science works in a*

crisis: Stanford, Stanford University Press, p. 58.

2. Leon T. Silver, Kevin Burke, George Carrier, Lee Hunt, Heinz Lowenstam, J. Murray Mitchell, Robert Pepin, Peter H. Schultz, Eugene Shoemaker, and George Wetherill.
3. 论述撞击与生物灭绝的斯诺伯德讨论会迄今曾举行过 3 次, 时间是 1981、1988 和 1994 年, 尽管第三次会议实际上是在休斯敦召开的。每次讨论会都出版过一大卷会议论文集, 这些文献便是有关该交叉学科领域研究进展的主要信息资源。三卷论文集为: (1) Silver, L. T. and Schultz, P. H., eds, 1982, Geological implications of impacts of large asteroids and comets on the Earth: Geological Society of America, Special Paper, v. 190, 528 p.; (2) Sharpton, V. L. and Ward, P. D., eds., 1990, Global catastrophes in Earth history: An interdisciplinary conference on impacts, volcanism, and mass mortality: Geological Society of America, Special Paper, v. 247, 631 p.; (3) Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S., eds., 1996, The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history: Geological Society of America Special Paper, v. 307, 580 p.
4. Alvarez, W., 1991, The gentle art of scientific trespassing: GSA Today, v. 1, p. 29 ~ 34.
5. Clemens, E. S., 1994, The impact hypothesis and popular science: conditions and consequences of interdisciplinary debate, in Glen, W., op, cit., p. 92 ~ 120.
6. 还有远多得多的高水平论文在一本薄薄的书中不可能一一提到。对遗漏掉其大作的那些作者, 我表示真诚的歉意!
7. Wilford, J. N., 1985, The riddle of the dinosaur: New York, Knopf, 304 p.; Raup, D. M., 1986, The Nemesis Affair: New York, W. W. Norton, 220 p.; Hsü, K. J., 1986, The great dying: San Diego, Harcourt Brace Jovanovich, 292 p.; Lampton, C., 1986, Mass extinctions—one theory of why the dinosaurs vanished: New York, Franklin Watts, 96 p.; Alvarez, L. W., 1987, Alvarez – Adventures of a physicist: New York, Basic Books, 292 p.; Muller, R. A., 1988, Nemesis: the death star—The story of a scientific rev-

- olution: New York, Weidenfeld and Nicolson, 193 p.; Smit, J., 1990, Meteorite impact, extinctions and the Cretaceous-Tertiary boundary: *Geologie en Mijnbouw*, v. 69, p. 187 ~ 204; Alvarez, W. and Asaro, F., 1990, What caused the mass extinction? An extraterrestrial impact: *Scientific American*, v. 263 (October), p. 78 ~ 84; Courtillot, V. E., 1990, What caused the mass extinction? A volcanic eruption: *Scientific American*, v. 263 (October), p. 85 ~ 92; Raup, D. M., 1991, Extinction—Bad genes or bad luck?: New York, W. W. Norton, 210 p.; Officer, C. and Page, J., 1993, Tales of the Earth: paroxysms and perturbations of the blue planet: New York, Oxford University Press, 226 p.; Clementi, F. and Clementi, D., 1993, Chi uccise i dinosauri?: Edimond, Città di Castello (PG), Italy, 199p.; Glen, W., ed., 1994, The mass – extinction debates: How science works in a crisis: Stanford CA, Stanford University Press, 370p.; Courtillot, V., 1995, La vie en catastrophes: Paris, Fayard, 278p.; Vaas, R., 1995, Der Tod kam aus dem All: Stuttgart, Franckh – Kosmos, 208 p.; Dauber, P. M. and Muller, R. A., 1996, The three big bangs: New York, Addison – Wesley, 207 p.; Frankel, C., 1996, La mort des dinosaures: l'hypothèse cosmique: Paris, Masson, 172 p.; Officer, C. B. and Page, J., 1996, The great dinosaur extinction controversy: Reading, MA, Addison – Wesley, 209 p.; Archibald, J. D., 1996, Dinosaur extinction and the end of an era: New York, Columbia University Press, 237 p.
8. Clemens, W. A., Archibald, J. D. and Hickey, L. J., 1981, Out with a whimper, not a bang: *Paleobiology*, v. 7, p. 293 ~ 298; Clemens, W. A., 1982, Patterns of extinction and survival of the terrestrial biota during the Cretaceous/Tertiary transition: *Geological Society of America Special Paper*, v. 190, p. 407 ~ 413; Archibald, J. D. and Clemens, W. A., 1982, Late Cretaceous extinctions: *American Scientist*, v. 70, p. 377 ~ 385.
 9. 蒙大拿州东部的地层由于河道受古河流冲刷变得出人意料地难以解释, 斯米特研究该地区时亦发现这一情况: Smit, J. and van der Kaars, S., 1984, Terminal Cretaceous extinctions in the Hell Creek Area, Montana: compatible with catastrophic extinction: *Science*, v. 223, p. 1177 ~

1179.

10. Signor, P. W. and Lipps, J. H. , 1982, Sampling bias, gradual extinction patterns, and catastrophes in the fossil record: Geological Society of America Special Paper, v. 190, p. 291 ~ 296.
11. Ward, P. , Wiedmann, J. and Mount, J. F. , 1986, Maastrichtian molluscan biostratigraphy and extinction patterns in a Cretaceous/Tertiary boundary section exposed at Zumaya, Spain: *Geology*, v. 14, p. 899 ~ 903; Ward, P. D. , 1990, A review of Maastrichtian ammonite ranges: Geological Society of America Special Paper, v. 247, p. 519 ~ 530.
12. Orth, C. J. , Gilmore, J. S. , Knight, J. D. , Pillmore, C. L. , Tschudy, R. H. and Fassett, J. E. , 1981, An iridium abundance anomaly at the palynological Cretaceous-Tertiary boundary in northern New Mexico: *Science*, v. 214, p. 1341 ~ 1343.
13. Thierstein, H. R. , 1982, Terminal Cretaceous plankton extinctions: a critical assessment: Geological Society of America Special Paper, v. 190, p. 385 ~ 399; Surlyk, F. and Johansen, M. B. , 1984, End-Cretaceous brachiopod extinctions in the chalk of Denmark: *Science*, v. 223, p. 1174 ~ 1177; Smit, J. and Romein, A. J. T. , 1985, A sequence of events across the Cretaceous-Tertiary boundary: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 74, p. 155 ~ 170; Nichols, D. J. and Fleming, R. F. , 1990, Plant microfossil record of the terminal Cretaceous event in the western United States and Canada: Geological Society of America Special Paper, v. 247, p. 445 ~ 454; Johnson, K. R. and Hickey, L. J. , 1990, Megafloral change across the Cretaceous/Tertiary boundary in the northern Great Plains and Rocky Mountains, U. S. A. : Geological Society of America Special Paper, v. 247, p. 434 ~ 444; Sheehan, P. M. and Fastovsky, D. E. , 1992, Major extinctions of land-dwelling vertebrates at the Cretaceous-Tertiary boundary, eastern Montana: *Geology*, v. 20, p. 556 ~ 560; D'Hondt, S. , Herbert, T. D. , King, J. and Gibson, C. , 1996, Planktonic foraminifera, asteroids, and marine production: Death and recovery at the Cretaceous-Tertiary boundary, in G. Ryder, D. Fastovsky, and S. Gartner, eds. , *The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth*

history: Geological Society of America Special Paper, v. 307, p. 303 ~ 317; Pospichal, J. J., 1996, Calcareous nannoplankton mass extinction at the Cretaceous/Tertiary boundary: an update, in Ryder, G., Fastovsky, D., and Gartner, S., eds., op. cit., p. 335 ~ 360. Huber, B. T., 1996, Evidence for planktonic foraminifer reworking versus survivorship across the Cretaceous-Tertiary boundary at high latitudes, in Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S., eds., op. cit., p. 319 ~ 334.

14. 普林斯顿大学的有孔虫类古生物学家凯勒是当前最强有力的 KT 灭绝并非由于撞击这一观点的倡导者。大力推崇这一观点的详尽的古生物学论文集, 请参见: MacLeod, N. and Keller, G., eds., 1996, Cretaceous-Tertiary mass extinctions: biotic and environmental changes: New York, W. W. Norton, 575 p. 也可参见: Archibald, J. D., op. cit.
15. Grieve, R. A. F., 1982, The record of impacts on earth: implications for a major Cretaceous/Tertiary impact event: Geological Society of America Special Paper, v. 190, p. 25 ~ 37.
16. 岩石与矿物之间的区别是很重要的, 固体地球是由岩石构成的, 而岩石又由矿物组成。矿物是些有特定化学组成的晶体颗粒, 其中原子以精确有序的几何图形排列着。岩石由矿物颗粒组成, 但每种矿物的数量是有变化的, 因此岩石的化学组成比矿物的化学组成更富有变化, 例如矿物石英和方解石各自的精确的化学组成为 SiO_2 和 CaCO_3 。但由这两种矿物混合组成的岩石, 能从带少许方解石的石英沙石经过均匀混合的砂质石灰岩变化到仅带有少量石英颗粒而几乎全部是方解石的石灰岩。
17. 石英的化学式为 SiO_2 , 二氧化碳的化学式为 CO_2 , 虽然两者的结构与特性完全不同, 但分子式看起来很相像。石英以固体矿物颗粒的状态存在, 巨大数量的原子以每个硅原子伴随两个氧原子的比率, 组织成双晶结构。二氧化碳是气体, 其中每个独立的分子有 3 个原子——一个碳原子和两个氧原子。在所有矿物的化学式中, 下标表明了矿物颗粒中巨大数量原子中各种原子的比率。
18. Smit, J. and Klaver, G., 1981, Sanidine spherules at the Cretaceous-Tertiary boundary indicate a large impact event: Nature, v. 292, p. 47 ~ 49.

19. 一个特定的元素,其不同同位素的原子核中具有同样数目的质子,但中子的数目不同,因而重量不同。碳 12 有 6 个质子和 6 个中子,而碳 13 有 6 个质子和 7 个中子,两者都是稳定的。碳 14 有 6 个质子和 8 个中子,有放射性衰变的特性。当两种同位素之一衰变或产生放射性时,那么矿物中同一种元素的这两种同位素比率就会改变;某些较轻的元素(例如碳和氧)的同位素在化学反应期间(像有机物的生长或海水的蒸发)也会变化。然而,大多数化学反应并不变更所含诸元素的同位素的比率。因此,该比率就某一元素给出了一种标志,能使地球化学家在矿物经历溶解、沉淀和化学反应时通过化学变化的迷宫跟踪其路径和去向。同位素的研究对我们理解地球如何发展变化贡献极大。
20. DePaolo, D. J., Kyte, F. T., Marshall, B. D., O'Neil, J. R. and Smit, J., 1983, Rb-Sr, Sm-Nd, K-Ca, O, and H isotopic study of Cretaceous-Tertiary boundary sediments, Caravaca, Spain: evidence for an oceanic impact site: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 64, p. 356 ~ 373.
21. Montanari, A., Hay, R. L., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H. V., Alvarez, L. W. and Smit, J., 1983, Spheroids at the Cretaceous-Tertiary boundary are altered impact droplets of basaltic composition: *Geology*, v. 11, p. 668 ~ 671.
22. Bohor, B. F., Foord, E. E., Modreski, P. J. and Triplehorn, D. M., 1984, Mineralogic evidence for an impact event at the Cretaceous-Tertiary boundary: *Science*, v. 224, p. 867 ~ 869.
23. French, B. M. and Short, N. M., eds., 1968, *Shock metamorphism of natural materials*: Baltimore, Mono Book Corp., 644 p.
24. Izett, G. A., 1990, The Cretaceous/Tertiary boundary interval, Raton Basin, Colorado and New Mexico, and its content of shockmetamorphosed minerals; evidence relevant to the K/T boundary impact-extinction theory: *Geological Society of America Special Paper*, v. 249, 100 p. Stishovite, a high-pressure form of quartz, and absolutely diagnostic of impact shock was reported from the Raton Basin KT boundary; McHone, J. F., Nieman, R. A., Lewis, C. F. and Yates, A. M., 1989, Stishovite at the Cretaceous-Tertiary boundary, Ra-

- ton, New Mexico, *Science*, v. 243, p. 1182 ~ 1184. In addition, Michael Owen and Mark Anders showed that the KT shocked-quartz grains gave cathodoluminescence colors very different from those of volcanic quartz grains; Owen, M. R. and Anders, M. H., 1988, Evidence from cathodoluminescence for non-volcanic origin of shocked quartz at the Cretaceous-Tertiary boundary: *Nature*, v. 334, p. 145 ~ 147.
25. Carter, N. L., Officer, C. B. and Drake, C. L., 1990, Dynamic deformation of quartz and feldspar: clues to causes of some natural crises: *Tectonophysics*, v. 171, pp. 373 ~ 391.
26. McLean, D. M., 1982, Deccan volcanism and the Cretaceous-Tertiary transition scenario: a unifying causal mechanism: *Syllogeus*, v. 39, p. 143 ~ 144.
27. Courtillot, V., Besse, J., Vandamme, D., Montigny, R., Jaeger, J.-J. and Cappetta, H., 1986, Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary?: *Earth and planetary Science Letters*, v. 80, p. 361 ~ 374; Courtillot, V. E., 1990, What caused the mass extinction? A volcanic eruption: *Scientific American*, v. 263 (October), p. 85 ~ 92.
28. Officer, C. B. and Drake, C. L., 1983, The Cretaceous-Tertiary transition: *Science*, v. 219, p. 1383 ~ 1390; Officer, C. B. and Drake, C. L., 1985, Terminal Cretaceous environmental effects: *Science*, v. 227, p. 1161 ~ 1167.
29. Raup, D. M. and Sepkoski, J. J., Jr., 1984, Periodicity of extinctions in the geologic past: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 81, p. 801 ~ 805.
30. Davis, M., Hut, P. and Muller, R. A., 1984, Extinction of species by periodic comet showers: *Nature*, v. 308, p. 715 ~ 717.
31. Alvarez, W. and Muller, R. A., 1984, Evidence from crater ages for periodic impacts on the Earth: *Nature*, v. 308, p. 718 ~ 720.
32. Whitmire, D. P. and Jackson, A. A., IV, 1984, Are periodic mass extinctions driven by a distant solar companion?: *Nature*, v. 308, p. 713 ~ 715; Rampino, M. R. and Stothers, R. B., 1984, Terrestrial mass extinctions, cometary impacts and the Sun's motion perpendicular to the galactic plane: *Nature*, v. 308, p. 709 ~ 712; Whitmire, D. P. and Matese, J. J., 1985, Peri-

- odic comet showers and Planet X: *Nature*, v. 313, p. 36 ~ 38.
33. Muller, R. A., 1988, *Nemesis: the death star* (The story of a scientific revolution): New York, Weidenfeld and Nicolson, 193 p. For another account, see Raup, D. M., 1986, *The Nemesis affair*: New York, W. W. Norton, 220 p.
34. Zoller, W. H., Parrington, J. R. and Phelan Kotra, J. M., 1983, Iridium enrichment in airborne particles from Kilauea Volcano: January 1983; *Science*, v. 222, p. 1118 ~ 1121; Olmez, I., Finnegan, D. L. and Zoller, W. H., 1986, Iridium emissions from Kilauea Volcano: *Journal of Geophysical Research*, v. 91, p. 653 ~ 663.
35. Bekov, G. I., Letokhov, V. S., Radaev, V. N., Badyukov, D. D. and Nazarov, M. A., 1988, Rhodium distribution at the Cretaceous/Tertiary boundary analysed by ultrasensitive laser photoionization: *Nature*, v. 332, p. 146 ~ 148.
36. Alvarez, W., Asaro, F. and Montanari, A., 1990, Iridium profile for 10 million years across the Cretaceous-Tertiary boundary at Gubbio (Italy): *Science*, v. 250, p. 1700 ~ 1702.
37. 1995年10月在劳伦斯·伯克利实验室的一次特定仪式上,阿萨罗正式地命名该仪器为“路易斯·W·阿尔瓦雷斯铍符合分光仪”。
38. Muller, R. A., 1985, Evidence for a solar companion star, in Papagiannis, M. D., ed., *The search for extraterrestrial life: recent developments*: Dordrecht, Riedel, p. 233 ~ 243.
39. Hut, P., Alvarez, W., Elder, W. P., Hansen, T., Kauffman, E. G., Keller, G., Shoemaker, E. M. and Weissman, P. R., 1987, Comet showers as a cause of mass extinctions: *Nature*, v. 329, p. 118 ~ 126; Montanari, A., 1990, Geochronology of the terminal Eocene impacts; an update: *Geological Society of America Special Paper*, v. 247, p. 607 ~ 616; Montanari, A., Asaro, F. and Kennett, J. P., 1993, Iridium anomalies of late Eocene age at Massignano (Italy), and ODP Site 689B (Maud Rise, Antarctica): *Palaos*, v. 8, p. 420 ~ 437.
40. Izett, G. A., 1990, op. cit.

41. Hartung, J. B. and Anderson, R. R. , 1988, A compilation of information and data on the Manson impact structure: Houston, Lunar and Planetary Institute, 32 p.
42. Anderson, R. R. , Hartung, J. B. , Shoemaker, E. M. and Roddy, D. J. , 1991, New research core drilling in the Manson impact structure, Iowa: A first look at the spectacular rocks formed at a K-T boundary impact site: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 23, p. A402; Koerberl, C. and Anderson, R. R. , eds. , 1996, The Manson impact structure, Iowa: anatomy of an impact crater: Geological Society of America Special Paper, v. 302, 468 p. Steiner, M. B. , 1996, Implications of magneto-mineralogic characteristics of the Manson and Chicxulub impact rocks, in Ryder, G. , Fastovsky, D. and Gartner, S. , eds. , The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history: Geological Society of America Special Paper, v. 307, p. 89 ~ 104.
43. Izett, G. A. , Cobban, W. A. , Obradovich, J. D. and Kunk, M. J. , 1993, The Manson impact structure: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and its distal impact ejecta in the Pierre Shale in southeastern South Dakota: Science, v. 262, p. 729 ~ 732.

第六章 致使恐龙灭绝的撞击坑

1. Maurrasse, F. J. -M. R. , 1980, New data on the stratigraphy of the Southern Peninsula of Haiti, in F. J. -M. R. Maurrasse, ed. , Présentations Transactions du 1er Colloque sur la Géologie d'Haïti: Port-au-Prince, p. 184 ~ 198.
2. Alvarez, W. , Alvarez, L. W. , Asaro, F. and Michel, H. V. , 1982, Current status of the impact theory for the terminal Cretaceous extinction: Geological Society of America Special Paper, v. 190, p. 305 ~ 315.
3. Hansen, T. , 1982, Macrofauna of the Cretaceous/Tertiary boundary interval in east-central Texas, in R. F. Maddocks, ed. , Texas Ostracoda: Houston, Department of Geosciences, University of Houston, p. 231 ~ 237.
4. Smit, J. and Romein, A. J. T. , 1985, A sequence of events across the Cretaceous-Tertiary boundary: Earth and Planetary Science Letters, v. 74, p. 155 ~ 170.

- 5 . Bourgeois, J. , Hansen, T. A. , Wiberg, P. L. and Kauffman, E. G. , 1988, A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas: *Science*, v. 241, p. 567 ~ 570.
- 6 . Hildebrand, A. R. , Boynton, W. V. and Zoller, W. H. , 1984, Kilauea volcano aerosols: evidence in siderophile element abundances for impact-induced oceanic volcanism at the K/T boundary: *Meteoritics*, v. 19, p. 239 ~ 240; Hildebrand, A. R. and Boynton, W. V. , 1987, The K/T impact excavated oceanic mantle: evidence from REE abundances: *Lunar and Planetary Science*, v. 18, p. 427 ~ 428.
- 7 . Hildebrand, A. R. , Penfield, G. T. , Kring, D. A. , Pilkington, M. , Camargo Z. , A. , Jacobsen, S. B. and Boynton, W. V. , 1991, Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico: *Geology*, v. 19, p. 867 ~ 871.
- 8 . Comejo T. , A. and Hernandez O. , A. , 1950, Las anomalías gravimétricas en la Cuenca Salina del Istmo, Planicie Costera de Tabasco, Campeche y Península de Yucatán: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, v. 2, p. 453 ~ 460.
- 9 . Penfield, G. T. and Camargo Z. , A. , 1981, Definition of a major igneous zone in the central Yucatán platform with aeromagnetism and gravity: *Society of Exploration Geophysicists Technical Program, Abstracts, and Biographies*, v. 51, p. 37.
- 10 . Muir, J. M. , 1936, *Geology of the Tampico region, Mexico*: Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, 280 p.
- 11 . Gamper, M. A. , 1977, *Acerca del límite Cretácico-Terciario en México*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, v. 1, p. 23 ~ 27; Gamper, M. A. , 1977, *Bioestratigrafía del Paleoceno y Eoceno de la Cuenca Tampico-Mislanita basada en los foraminíferos planctónicos*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, v. 1, p. 117 ~ 128; Gamper-Longoria, M. A. and Longoria, J. , 1984, Foraminiferal biochronology at the Cretaceous/Tertiary boundary: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 16, p. 84.

12. Sigurdsson, H. , D' Hondt, S. , Arthur, M. A. , Bralower, T. J. , Zachos, J. C. , Van Fossen, M. and Channell, J. E. T. , 1991, Glass from the Cretaceous-Tertiary boundary in Haiti: *Nature*, v. 349, p. 482 ~ 487; Izett, G. A. , 1991, Tektites in Cretaceous-Tertiary boundary rocks on Haiti and their bearing on the Alvarez impact extinction hypothesis: *Journal of Geophysical Research*, v. 96, p. 20, 879 ~ 20, 905; Maurrasse, F. J. -M. R. and Sen, G. , 1991, Impacts, tsunamis, and the Haitian Cretaceous-Tertiary boundary layer: *Science*, v. 252, p. 1690 ~ 1693; Lyons, J. B. and Officer, C. B. , 1992, Mineralogy and petrology of the Haiti Cretaceous/Tertiary section: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 109, p. 205 ~ 224.
13. 从很新近的一次撞击获得的第一批微玻璃陨石样品是由格拉斯发现的。参见: Glass, B. P. , 1967, Microtektites in deep-sea sediments: *Nature*, v. 214, p. 372 ~ 374.
14. Sigurdsson, H. , Bonté, P. , Turpin, L. , Chaussidon, M. , Metrich, N. , Steinberg, M. , Pradel, P. and D' Hondt, S. , 1991, Geochemical constraints on source region of Cretaceous/Tertiary impact glasses: *Nature*, v. 353, p. 839 ~ 842.
15. Margolis, S. V. , Claeys, P. and Kyte, F. T. , 1991, Microtektites, microkrytites and spinels from a Late Pliocene asteroid impact in the southern ocean: *Science*, v. 251, p. 1594 ~ 1597.
16. 对 KT 界线事件感兴趣的科学家把采用现代技术重新钻探该撞击坑定为主要目标。在休斯敦月球和行星研究所工作的沙普顿和在墨西哥城国立大学工作的马林共同领导下,正在竭力完成此项工作。
17. Swisher, C. C. , III , Grajales-Nishimura, J. M. , Montanari, A. , Margolis, S. V. , Claeys, P. , Alvarez, W. , Renne, P. , Cedillo-Pardo, E. , Maurrasse, F. J. -M. R. , Curtis, G. H. , Smit, J. and McWilliams, M. O. , 1992, Coeval $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of 65.0 million years ago from Chicxulub Crater melt rock and Cretaceous-Tertiary boundary tektites: *Science*, v. 257, p. 954 ~ 958; Sharpton, V. L. , Dalrymple, G. B. , Marín, L. E. , Ryder, G. , Schuraytz, B. C. and Urrutia, J. , 1992, New links between the Chicxulub impact structure

- and the Cretaceous/Tertiary boundary: *Nature*, v. 359, p. 819 ~ 821.
18. Blum, J. D. and Chamberlain, C. P., 1992, Oxygen isotope constraints on the origin of impact glasses from the Cretaceous-Tertiary boundary: *Science*, v. 257, p. 1104 ~ 1107; Blum, J. D., Chamberlain, C. P., Hingston, M. P., Koeberl, C., Marin, L. E., Schuraytz, B. C. and Sharpton, V. L., 1993, Isotopic comparison of K/T boundary impact glasses with melt rock from the Chicxulub and Manson impact structures: *Nature*, v. 364, p. 325 ~ 327.
 19. Smit, J., Montanari, A., Swinburne, N. H. M., Alvarez, W., Hildebrand, A. R., Margolis, S. V., Claeys, P., Lowrie, W. and Asaro, F., 1992, Tektite-bearing, deep-water clastic unit at the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico: *Geology*, v. 20, p. 99 ~ 103; Alvarez, W., Smit, J., Lowrie, W., Asaro, F., Margolis, S. V., Claeys, P., Kastner, M. and Hildebrand, A. R., 1992, Proximal impact deposits at the Cretaceous-Tertiary boundary in the Gulf of Mexico: A restudy of DSDP Leg 77 Sites 536 and 540: *Geology*, v. 20, p. 697 ~ 700.
 20. Officer, C. B., Drake, C. L., Pindell, J. L. and Meyerhoff, A. A., 1992, Cretaceous-Tertiary events and the Caribbean caper: *GSA Today*, v. 2, p. 69 ~ 75; Officer, C. B. and Page, J., 1996, The great dinosaur extinction controversy: Reading, MA, Addison-Wesley, 209p.
 21. Keller, G., MacLeod, N., Lyons, J. B. and Officer, C. B., 1993, Is there evidence for Cretaceous-Tertiary boundary-age deep-water deposits in the Caribbean and Gulf of Mexico?: *Geology*, v. 21, p. 776 ~ 780. For criticisms of this paper and the responses of Keller and her colleagues, see *Geology*, v. 22, p. 953 ~ 958, 1993.
 22. Alvarez, W., Grajales N., J. M., Martinez S., R., Romero M., P. R., Ruiz L., E., Guzmán R., M. J., Zambrano A., M., Smit, J., Swinburne, N. H. M. and Margolis, S. V., 1992, The Cretaceous-Tertiary boundary impact-tsunami deposit in NE Mexico: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 24, p. A331.
 23. 还有一些其他方面的支持撞击的证据,在本书正文中未曾详尽讨论。它们是:(1)KT界线的小球体包含由蒸汽云晶化的富镍尖晶石

和部分从撞击物产生的富镍尖晶石。(2)地外氨基酸在斯蒂文斯克林特的 KT 界线黏土中被找到。(3)已从 KT 界线上回收到了由撞击产生的微小金刚石。(4)从钨的同位素比率表明在 KT 界线的这种铂族元素来源于陨星。

24. Smit, J., Roep, Th. B., Alvarez, W., Montanari, A., Claeys, P., Grajales-Nishimura, J. M. and Bermudez, J., 1996, Coarse-grained, clastic sandstone complex at the K/T boundary around the Gulf of Mexico: deposition by tsunami waves induced by the Chicxulub impact?, in Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S., eds., *The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history: Geological Society of America Special Paper*, v. 307, p. 151 ~ 182.

第七章 奇克苏鲁布事件后的世界

1. Sharpton, V. L., Burke, K., Camargo Zanoguera, A., Hall, S. A., Lee, D. S., Marín, L. E., Suárez Reynoso, G., Quezada Muñeton, J. M., Spudis, P. D. and Urrutia Fucugauchi, J., 1993, Chicxulub multiring impact basin: size and other characteristics derived from gravity analysis: *Science*, v. 261, p. 1564 ~ 1567.
2. Hildebrand, A. R., Pilkington, M., Connors, M., Ortiz Aleman, C. and Chavez, R. E., 1995, Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes: *Nature*, v. 376, p. 415 ~ 417.
3. Camargo Z., A. and Suárez R., G., 1994, Evidencia sísmica del cráter de impacto de Chicxulub: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración*, v. 34, p. 1 ~ 28.
4. Pope, K. O., Ocampo, A. C. and Duller, C. E., 1991, Mexican site for K/T impact crater: *Nature*, v. 351, p. 105; Pope, K. O., Ocampo, A. C. and Duller, C. E., 1993, Surficial geology of the Chicxulub impact crater, Yucatán, Mexico: *Earth, Moon, and Planets*, v. 63, p. 93 ~ 104.
5. Alvarez, W., 1996, Trajectories of ballistic ejecta from the Chicxulub Crater, in Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S., eds., *The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history: Geological Society of*

- America Special Paper, v. 307, p. 141 ~ 150.
6. Bostwick, J. A. and Kyte, F. T., 1996, The size and abundance of shocked quartz in Cretaceous-Tertiary boundary sediments from the Pacific Basin, in Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S., eds., *The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history: Geological Society of America Special Paper*, v. 307, p. 403 ~ 415.
 7. Bohor, B. F., 1990, Shocked quartz and more; Impact signatures in Cretaceous/Tertiary boundary clays, in Sharpton, V. L. and Ward, P. D., eds., *Global catastrophes in Earth history: Geological Society of America Special Paper*, v. 247, p. 335 ~ 342; Izett, G. A., 1990, The Cretaceous/Tertiary boundary interval, Raton Basin, Colorado and New Mexico, and its content of shock-metamorphosed minerals; evidence relevant to the K/T boundary impact-extinction theory: *Geological Society of America Special Paper*, v. 249, p. 1 ~ 100.
 8. Kieffer, S. W., 1981, Fluid dynamics of the May 18 blast at Mount St. Helens: *U. S. Geological Survey Professional Paper*, v. 1250, p. 379 ~ 400; Kieffer, S. W., 1989, *Geologic nozzles: Reviews of Geophysics*, v. 21, p. 3 ~ 38; Simonds, C. H. and Kieffer, S. W., 1993, Impact and volcanism; a momentum scaling law for erosion: *Journal of Geophysical Research*, B, v. 98, p. 14 321 ~ 14 337.
 9. Melosh, H. J., 1988, *Impact cratering: a geologic process*: Tucson, University of Arizona Press, 272 p.
 10. Alvarez, W., Claeys, P. and Kieffer, S. W., 1995, Emplacement of KT boundary shocked quartz from Chicxulub crater: *Science*, v. 269, p. 930 ~ 935.
 11. 对撞击坑的最近的汇集是由格里夫和佩索宁 (Pesonen, L. J.) 完成的, 1992, *The terrestrial impact record: Tectono-physics*, v. 216, p. 1 ~ 30.
 12. Lowe, D. R. and Byerly, G. R., 1986, Early Archean silicate spherules of probable impact origin, South Africa and western Australia: *Geology*, v. 14, p. 83 ~ 86; Lowe, D. R., Byerly, G. R., Asaro, F. and Kyte, F. T., 1989, Geological and geochemical record of 3 400-million-year-old terrestrial me-

- teorite impacts: *Science*, v. 245, p. 959 ~ 962.
13. Gostin, V. A., Haines, P. W., Jenkins, R. J. F., Compston, W. and Williams, I. S., 1986, Impact ejecta horizon within Late Precambrian shales, Adelaide Geosyncline, South Australia: *Science*, v. 233, p. 198 ~ 200; Williams, G. E., 1986, The Acraman impact structure: source of ejecta in Late Precambrian shales, South Australia: *Science*, v. 233, p. 200 ~ 203; Gostin, V. A., Keays, R. R. and Wallace, M. W., 1989, Iridium anomaly from the Acraman impact ejecta horizon: impacts can produce sedimentary iridium peaks: *Nature*, v. 340, p. 542 ~ 544; Wallace, M. W., Gostin, V. A. and Keays, R. R., 1990, Acraman impact ejecta and host shales: Evidence for low-temperature mobilization of iridium and other platinoids: *Geology*, v. 18, p. 132 ~ 135.
 14. Raup, D. M., 1991, Extinction—Bad genes or bad luck?: New York, W. W. Norton, 210p.
 15. McLaren, D. J., 1970, Presidential address: Time, life and boundaries: *Journal of Paleontology*, v. 44, p. 801 ~ 815.
 16. Wang, K., Orth, C. J., Attrep, M., Jr., Chatterton, B. D. E., Hou, H. and Geldsetzer, H. H. J., 1991, Geochemical evidence for a catastrophic biotic event at the Frasnian/Fammenian boundary in south China: *Geology*, v. 19, p. 776 ~ 779; Wang, K., 1992, Glassy microspherules (microtektites) from an Upper Devonian limestone: *Science*, v. 256, p. 1547 ~ 1550.
 17. Claeys, P., Casier, J.-G. and Margolis, S. V., 1992, Microtektites and mass extinctions: evidence for a Late Devonian asteroid impact: *Science*, v. 257, p. 1102 ~ 1104.
 18. Bice, D. M., Newton, C. R., McCauley, S., Reiners, P. W. and McRoberts, C. A., 1992, Shocked quartz at the Triassic-Jurassic boundary in Italy: *Science*, v. 255, p. 443 ~ 446.
 19. Montanari, A., Asaro, F. and Kennett, J. P., 1993, Iridium anomalies of late Eocene age at Massignano (Italy), and ODP Site 689B (Maud Rise, Antarctica): *Palaos*, v. 8, p. 420 ~ 437; Clymer, A. K., Bice, D. M. and Montanari, A., 1996, Shocked quartz from the late Eocene: impact evidence from

- Massignano, Italy: *Geology*, v. 24, p. 483 ~ 486.
20. Masaitis, V. L. , 1994, Impactites from Popigai crater in Dressler, B. O. , Grieve, R. A. F. and Sharpton, V. L. , eds. , Large meteorite impacts and planetary evolution: Geological Society of America Special Paper, v. 293, p. 153 ~ 162; Koeberl, C. , Poag, C. W. , Reimold, W. U. and D. Brandt, 1996, Impact origin of the Chesapeake Bay structure and the source of the North American tektites: *Science*, v. 271, p. 1263 ~ 1266.
21. Kyte, F. T. , Zhou, Z. and Wasson, J. T. , 1981, High noble metal concentrations in a late Pliocene sediment: *Nature*, v. 292, P. 417 ~ 420; Kyte, F. T. , Zhou, L. and Wasson, J. T. , 1988, New evidence on the size and possible effects of a Late Pliocene oceanic asteroid impact: *Science*, v. 241, p. 63 ~ 65; Margolis, S. V. , Claeys, P. and Kyte, F. T. , 1991, Microtektites, microkrystites and spinels from a Late Pliocene asteroid impact in the southern ocean: *Science*, v. 251, p. 1594 ~ 1597.
22. Leroux, H. , Warme, J. E. and Doukan, J. -C. , 1995, Shocked quartz in the Alamo breccia, southern Nevada: Evidence for a Devonian impact event: *Geology*, v. 23, p. 1003 ~ 1006.
23. Warme, J. E. and Sandberg, C. A. , 1996, Alamo megabreccia: Record of a Late Devonian impact in southern Nevada: *GSA Today*, v. 6, p. 1 ~ 7.
24. “圈闭”一词来自荷兰文“梯子”一词,特指印度的德干玄武岩流侵蚀形成的阶梯状地形。意义扩展后的“圈闭”一词也应用于大陆上其他的大型玄武岩地区。这种地形中最大者为西伯利亚圈闭。
25. Erwin, D. H. , 1993, *The great Paleozoic crisis: life and death in the Permian*: New York, Columbia University Press, 327p. ; Erwin, D. H. , 1994, The Permo-Triassic extinction: *Nature*, v. 367, p. 231 ~ 236; Erwin, D. H. , 1996, The mother of mass extinctions: *Scientific American*, v. 275(July), p. 72 ~ 78.
26. Renne, P. R. , Zhang, Z. , Richards, M. A. , Black, M. T. and Basu, A. R. , 1995, Synchrony and causal relations between Permian-Triassic boundary crises and Siberian flood volcanism: *Science*, v. 269, p. 1413 ~ 1416.
27. 曾有一种说法是,某处受到撞击后所触发的火山活动的地震能量

会汇聚到恰好位于地球另一边的对跖点上。但是,在 KT 界线时代,印度距奇克苏鲁布的对跖点有 3 000 千米之遥,所以看来这种说法没有道理。

28. Levy, D. H. , 1995, Impact Jupiter: the crash of comet Shoemaker-Levy 9: New York, Plenum Press, 290 P. ; Spencer, J. R. and Mitton, J. , eds. , 1995, The great comet crash: the impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter: New York, Cambridge University Press, 118 p; Dauber, P. M. and Muller, R. A. , 1996, The three big bangs: New York, Addison-Wesley, 207 p. , ch. 2.

上海科技教育出版社

哲人石丛书

Philosopher's Stone Series

当代科普名著系列

确定性的终结

PCR 传奇

虚实世界

完美的对称

超越时空

欺骗时间

失败的逻辑

技术的报复

地外文明探秘

生机勃勃的尘埃

大爆炸探秘

暗淡蓝点

探求万物之理

卡尔·萨根的宇宙

亚原子世界探秘

终极抉择

激情澎湃

霸王龙和陨星坑

双螺旋探秘

责任编辑 卞毓麟

何妙福

装帧设计 汤世梁

ISBN 7-5428-2564-X



9 787542 825643 >

ISBN 7-5428-2564-X/N·418

定价:

16.90 元